SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©BERNARD MARINEZ/SETA - KUBAIS/SHUTTERSTOCK - IMAGO/PANORAMIC/BESTIMAGE

Dossier 50 pages

LES SECRETS DES NOMBRES PREMIERS

p.80

SOPHIE ADENOT
Une Française vers la Lune

p.86

Origines
Réserves
Sécheresses
Inondations

Spécial eau

+ Le scandale de l'eau potable

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 917-918 - JUILLET-AOÛT 2023 - SPÉCIAL EAU

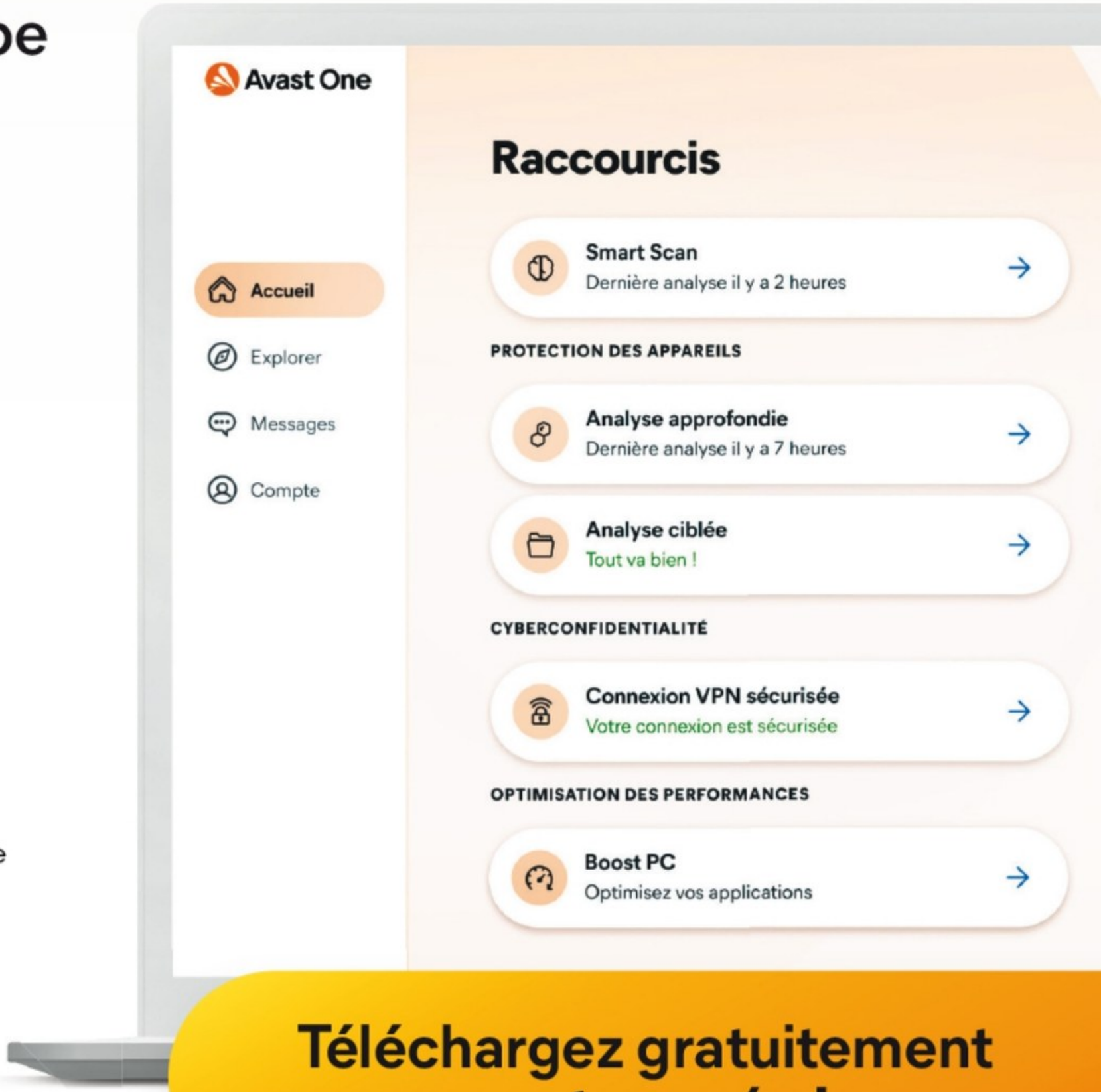
JUILLET-AOÛT 2023 - N° 917-918 - ALL 8,60 € - LUX 6,90 € - BEL 6,90 € - ITALIE 6,90 € - ESP 6,90 € - GRECE 6,90 €
PORT-CONT 6,90€ - SUISSE 11,70CHF - DOM 7,10€ - TOM 980 XPF - MAROC 70MAD - TUNISIE 12,80 TND - CAN 10,50 $CAD

L 13418 - 917 - F: 6,50 € - RD

Bien plus qu'un simple antivirus

Avast One regroupe protection, confidentialité et performances.

- Bloquez virus, malwares, logiciels espions et ransomwares
- Sécurisez vos achats et transactions bancaires sur Internet
- Recevez une alerte en cas de piratage de vos comptes web
- Protégez-vous des attaques par phishing et des sites d'arnaques
- Sécurisez votre connexion et protégez votre argent avec un VPN
- Dissimulez votre position géographique
- Masquez votre adresse IP pour une confidentialité 24h/24 et 7j/7
- Accélérez, nettoyez et optimisez vos appareils



Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

N'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

presse citron
Meilleur antivirus
★★★★★

01NET
Suite hyper complète
★★★★

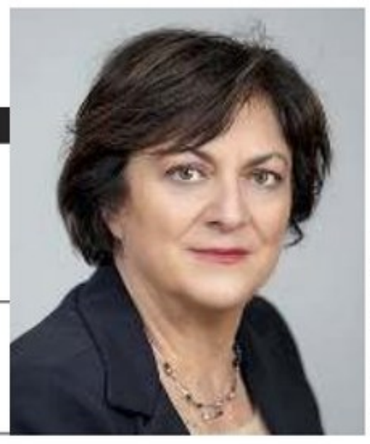
PC EDITORS' CHOICE
Choix de la rédaction
★★★★½

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

La course vers l'infini

C'est l'infiniment grand (ou presque) qui nous ébahit ces derniers temps avec des images toujours plus époustouflantes du télescope spatial James-Webb. À preuve, pour les lecteurs fidèles de *Sciences et Avenir*, la couverture qui lui était consacrée au mois de juin. Et comme chacun sait, sonder l'Univers de plus en plus lointain, c'est aussi remonter dans le temps. Revenir vers des débuts où, surprise pour nombre d'astrophysiciens, se distinguent déjà des structures telles les galaxies. Reste que ce très lointain, tout étonnant qu'il soit, est un monstre de gigantisme par rapport à ce qu'il fut, des centaines de millions d'années auparavant, lors de son inaccessible origine.

Univers minuscule. Inaccessible ? Pour l'instant oui, car l'infiniment petit (ou presque) impose ici sa marque. Parce que les deux théories fondamentales de la nature, la relativité générale (pour le très grand) et la physique quantique (pour le très petit) ne sont pas unifiées, surgit une limite en deçà de laquelle la science n'a plus son mot à dire. Dans le dernier numéro de *La Recherche* titré « L'infiniment petit », le cosmologiste Vincent Vennin rappelle cette incapacité *« de représenter la nature à des échelles très petites »*.

Stop vers l'origine. En toute rigueur, c'est un « infiniment petit de la nature » qu'il faudrait évoquer. Et non cet infini des maths pures avec lequel les mathématiciens aiment à jongler. En l'occurrence, on aura décelé le stop qui barre le chemin de la route vers l'origine. Il s'érige à la très fameuse longueur de Planck, en deçà de laquelle impossible de parler scientifiquement de l'Univers. Lilliputien d'après le Big Bang, sa taille ne dépasse alors pas $1{,}6 \times 10^{-35}$ mètre, environ cent milliards de milliards de fois moins qu'un proton. Vertigineux.

Quetta et quecto. Le monde scientifique lui-même s'efforce de clarifier ses appellations pour qu'on ne s'y perde pas, avec l'inflation vers le gigantesque et la chute vers le minuscule. La dernière conférence générale des poids et mesures, en novembre 2022, a ainsi rajouté quatre préfixes, là où les bons vieux kilo, micro, méga se retrouvent complètement dépassés. Du côté des géants, avec un « a » final, on trouve ronna (10^{27}) et quetta (10^{30}). Pour les invisibles, qui sonnent en « o », ronto (10^{-27}) et quecto (10^{-30}).

Deux nanomètres. Un effort supplémentaire, et l'inimaginable ère de Planck, à 10^{-43} seconde du Big Bang, finira bien par être rattrapée par la patrouille des préfixes scientifiques. En attendant, dans la vraie vie de l'industrie électronique, on en est encore à piétiner dans les nanos (10^{-9}). Rien de facile pour autant. Le franchissement de la barre des 2 nanomètres pour les semi-conducteurs est annoncé pour 2024, et tout le monde court après les deux champions, le taïwanais TSMC et le sud-coréen Samsung. Toujours plus petit pour toujours plus de puissance de calcul. Course infinie (ou presque). ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Hydrogène vert, révolution annoncée dans l'industrie et les transports
(*Sciences et Avenir-La Recherche,* n° 916, juin 2023)

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt l'article concernant la fabrication de l'hydrogène par électrolyse. Ce qui m'étonne quelque peu, c'est l'allusion à la pénurie d'eau douce qui se profile déjà à l'horizon et qui pourrait être aggravée par ladite électrolyse. Je peux m'imaginer que des quantités faramineuses d'eau seront nécessaires pour les besoins d'hydrogène dans le futur. Cela a-t-il été pris en compte ?

Dieter Oster

S. et A. : Julie Mougins, en charge des technologies hydrogènes au CEA, a fait le calcul suivant : l'Union européenne vise une production d'hydrogène renouvelable annuelle de 10 millions de tonnes (Mt), plus 10 Mt supplémentaires d'importations annuelles en 2030. Ce plan est très ambitieux car il requiert le déploiement sur le sol européen de 100 gigawatts d'électrolyseurs, ce qui consommera 100 Mt d'eau/an pour produire les 10 Mt/an d'hydrogène. Cette consommation en eau représente environ 17 % de la capacité du barrage de Serre-Ponçon (Hautes-Alpes), le plus grand de France, pour produire tout l'hydrogène prévu à l'échelle européenne. C'est donc une consommation relativement modeste pour l'ensemble de la production européenne.

Pénurie de platine ?

Votre article sur l'hydrogène vert évoque aussi les piles à combustible… Or, celles-ci utilisent le platine comme catalyseur dont la production annuelle mondiale est de 130 tonnes ! Une grande partie est utilisée en bijouterie et dans l'industrie chimique. Comment imaginer fournir 100 tonnes pour les voitures à hydrogène ?

Guy Adrian

S. et A. : Aujourd'hui, c'est le pot catalytique qui consomme 41 % d'éléments du groupe des platines, devant la joaillerie (29 %). Avec la fin programmée des véhicules thermiques, l'usage du platine devrait donc passer du pot catalytique à la pile à combustible. La diminution des ventes de véhicules diesel fait déjà chuter la demande dans le secteur. Mais la demande a doublé lors de la dernière décennie, et la rareté est d'autant plus sévère que deux pays concentrent 85 % des gisements, l'Afrique du Sud et la Russie. Selon France Hydrogène, les besoins en platine pour les piles ont diminué d'un facteur 2000 depuis le début des années 1960 et le recyclage se développe. Des matériaux de substitution sont également testés comme le graphène, le tungstène, le cobalt.

Gravité des planètes

Dans l'article « Surprendre les planètes au berceau » (*S. et. A* n° 916), il est écrit que « *la gravité d'une planète augmente à mesure qu'elle se contracte* ». Du peu que je me souvienne de la physique, la gravité dépend de la masse et non pas de la densité.

Jean-Marie Devriendt

S. et A. : Vous avez tout à fait raison pour la gravité moyenne d'une planète. Ce que les chercheurs évaluent avec leurs observations (luminosité, spectres), c'est plus précisément la gravité de surface, qui affecte le mélange des particules de poussière dans l'atmosphère et le rendu lumineux d'une exoplanète. Étant donné que la gravité de surface évolue en $1/R^2$, si R diminue (contraction de la planète), $1/R^2$ augmente. La gravité de surface de la planète augmente donc bien à mesure qu'elle se contracte.

Producteur d'énergie

Le numéro 915 est intitulé « Les solutions pour produire son énergie ». On ne produit pas de l'énergie. On ne fait que la transformer. On change sa nature pour la rendre utilisable. Cela induit dans l'idée commune que l'on peut produire de l'énergie comme on produit des bonbons ou des voitures. Cela fausse donc la perception du public sur ce que sont les problèmes actuels de mise à disposition d'énergie : quelles sources sont possibles, en quelle quantité et comment la rendre utilisable.

Gérald Nicolas

S. et A. : Effectivement on ne fait que transformer l'énergie. C'est ce que fait le monde vivant depuis qu'existe la couche d'ozone stratosphérique qui nous protège du rayonnement solaire, soit depuis 2,8 milliards d'années (la « grande oxygénation »). Mais nous sommes bien obligés d'employer la vulgate des « producteurs » et distributeurs d'énergie qui ne parlent, eux, que de production.

Précisions

Dans la brève sur la transpiration des arbres perturbée par le réchauffement climatique (*S. et A.* n° 915), le taux d'humidité relative de l'air n'est pas en augmentation, comme nous l'avons écrit, mais en diminution.

Dans notre article sur le biocontrôle en France (*S. et A.* n° 916), 100 000 ha de maïs sont traités par biocontrôle contre la pyrale sur les 3 millions d'hectares consacrés à cette culture et non 500 000 ha (la surface totale traitée contre la pyrale).

Courriels à :
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

L'eau, une richesse négligée

« *L'eau deviendra une ressource plus précieuse que le pétrole.* » Cette prophétie a été faite par l'ancien secrétaire général des Nations unies Boutros Boutros-Ghali. En 1992! Deux ans après le premier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) ; quelques semaines à peine avant la tenue du sommet de la Terre de Rio et de sa déclaration appelant à mieux gérer la planète ; dix ans avant celui de Johannesburg dédié au développement durable et qui consacra de larges débats à la protection des ressources en eau. Trois décennies plus tard, nous y sommes. Selon le dernier rapport de l'Agence internationale de l'énergie publié le 14 juin, le *peak oil* — le pic historique de la consommation de pétrole après lequel celle-ci commencera à décliner — serait atteint dès 2028, alors qu'il était précédemment annoncé pour 2035 et sans cesse repoussé. De son côté, dans son dernier rapport de synthèse publié en mars, le Giec écrivait : « *Environ 3,3 à 3,6 milliards de personnes vivent dans des contextes très vulnérables au changement climatique* […] *L'augmentation des événements climatiques extrêmes a exposé des millions de personnes à une insécurité alimentaire aiguë et a réduit la sécurité de l'eau.* […] *Environ la moitié de la population mondiale connaît actuellement une grave pénurie d'eau pendant au moins une partie de l'année en raison d'une combinaison de facteurs climatiques et non climatiques.* » La transition de l'ère de l'or noir à celle de l'or bleu a bel et bien commencé. Pour mesurer la valeur de cette richesse négligée, il faut déjà bien la comprendre. C'est ce que nous vous proposons ce mois-ci. L'eau est d'abord une molécule simplissime aux propriétés physiques contre-intuitives, dont on commence à peine à comprendre l'origine. Un élément dans lequel de tout temps l'humain a aimé se baigner. Un berceau de vie qui devient aujourd'hui une menace pour la paix. Par sa rareté ou ses ravages lors d'événements climatiques extrêmes, sa surexploitation et sa pollution. N'oublions pas que nous sommes faits de deux tiers d'eau. La protéger, c'est d'abord se protéger soi-même ■ @mathieu_nowak

> « La transition de l'ère de l'or noir à celle de l'or bleu a bel et bien commencé »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, F. COPREAUX, C. COUMEAU, M. DA PONTE, N. DURBECQ, N. C. GUTIERREZ, P. KALDY, C. LAURENS, E. TISSANDIÉ, S. VANEL
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOUIN directrice numérique déléguée - Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un message « L'Histoire », un message « First Voyages » ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Explorez en croisière l'un des fleuves les plus mythiques et les plus imposants d'Asie : le **Mékong**. À travers le **Laos** et la **Thaïlande** ou le **Vietnam** et le **Cambodge**, vous profiterez de multiples conférences dispensées par nos prestigieux et passionnés intervenants tels que **Franck Ferrand**, **Chantal Forest** ou **Pascal Boniface**.

*Prix incluant une remise de 400€/pers. pour toute réservation avant le 30 juin 2023. CGV disponibles sur notre site.

La carte ci-contre correspond à l'itinéraire de janvier 2024. Photos : ©AdobeStock ©BassacPandaw

CROISIÈRES SUR LE MÉKONG

par Voyages d'exception

PLUSIEURS DÉPARTS :

NOV. 2023 • JANV. 2024 • FÉV. 2024

Dès **5 390 €**/pers.*

Réservations et informations

Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code MEKSC à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

VOYAGES-EXCEPTION.FR

RÊVER À NOUVEAU C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE

Apprentis d'Auteuil aide chaque année près de 40 000 jeunes[1] en difficulté à bâtir leur avenir.

Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org

APPRENTIS D'AUTEUIL

La confiance peut sauver l'avenir

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2022.

Agence Marcel - © Yann Le Pape

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 917-918 / Juillet-Août 2023

DOSSIER P. 28

Spécial eau

L'eau est au cœur des préoccupations climatiques, géopolitiques, scientifiques et sociales. Afin de mieux comprendre les menaces qui pèsent sur cette ressource vitale, la rédaction de « Sciences et Avenir-La Recherche » s'est mobilisée pour concevoir ce dossier spécial de 50 pages.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** La chasse aux ondes gravitationnelles est rouverte / Des geysers géants jaillissent d'Encelade

80 **Nombres premiers : le mystère de leur répartition bientôt résolu ?**

86 **Entretien avec l'astronaute Sophie Adenot**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Le corail possède son propre microbiome / Le réchauffement climatique accroît les turbulences en vol

90 **Un an après les feux, les Landes veulent se réinventer**

94 **Sous la mer, des prairies veillent sur la planète**

SANTÉ

20 **ACTUALITÉS** Un paraplégique retrouve son autonomie / Des traitements prometteurs contre le glioblastome

98 **Nutri-score : le défi des aliments ultratransformés**

104 **Premier remède éprouvé contre le hoquet**

106 **Nutrition : les modes de cuisson sur le gril**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** Deux nouvelles victimes découvertes à Pompéi / Le grand melting-pot africain de « sapiens »

108 **Pirates : plongée sur les épaves des insaisissables écumeurs des mers**

113 **Entretien avec Anne-Caroline Rendu-Loisel, assyriologue**

TRANSVERSALES

118 **Sélection livres**

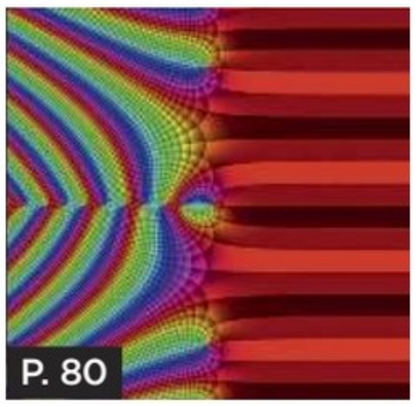
122 **Expositions**

124 **Les ciels de juillet et d'août**

126 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

128 **Questions de lecteurs**

129 **Jeux**



P. 80

Nombres premiers : un mystère bientôt résolu ?

Le mathématicien Yitang Zhang prétend apporter une solution partielle à la conjecture de Riemann sur la répartition des nombres premiers, l'un des « problèmes du millénaire ».

P. 86

« Les missions sur la Lune me font rêver »

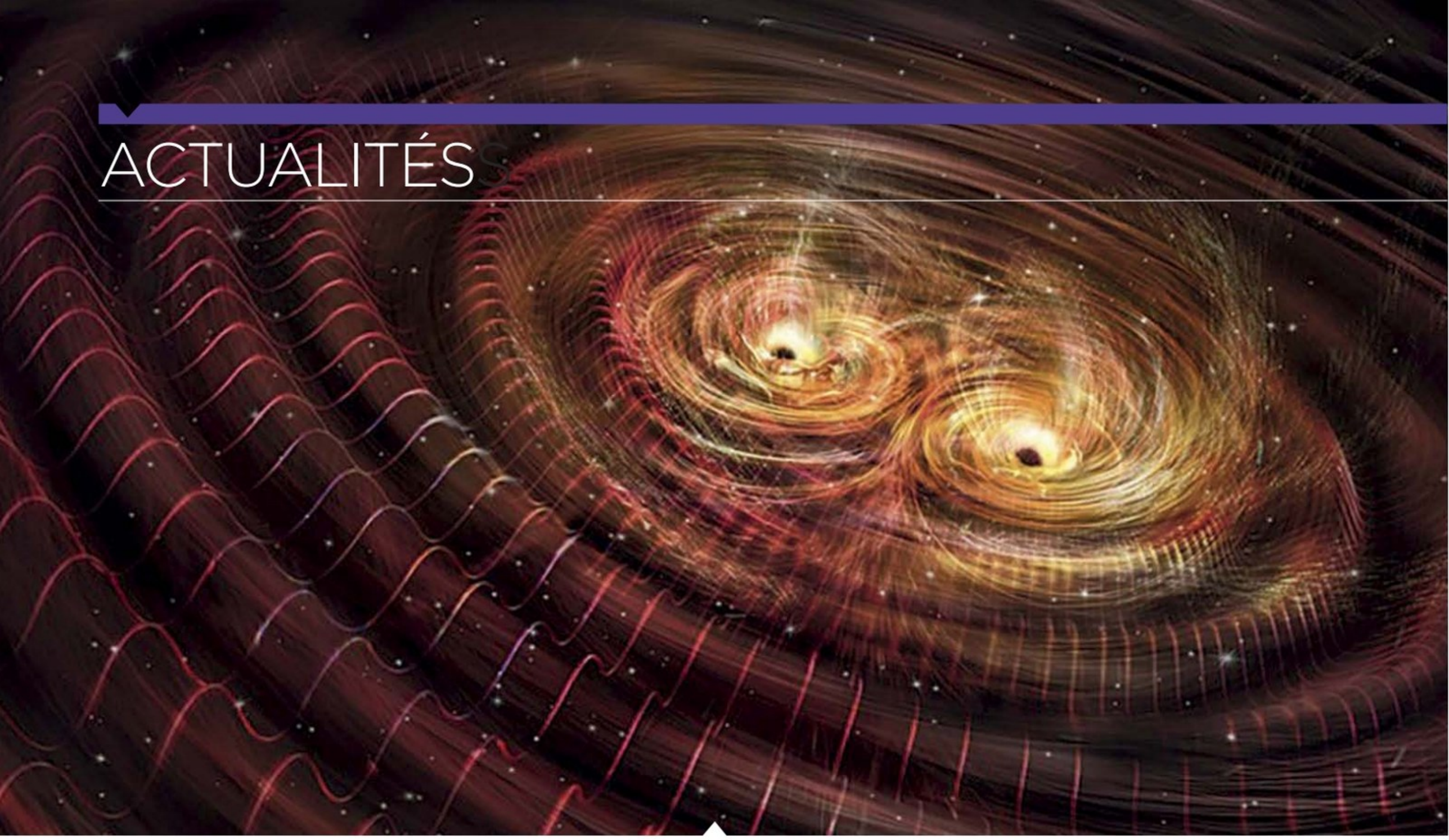
Sophie Adenot, la nouvelle astronaute française sélectionnée par l'Agence spatiale européenne, a commencé son entraînement à Cologne, en Allemagne. Entretien.

P. 98

Nutri-score : le défi des aliments ultratransformés

Dix ans après sa création, l'indicateur nutritionnel affine son algorithme. Mais les chercheurs peinent à définir les critères des aliments ultratransformés. Explications.

TEGUH SANTOSA/ GETTY IMAGES - EMPETRISOR-WIKIMEDIA COMMONS CC BY-SA 4.0 - INA FASSBENDER / AFP - BURGER / PHANIE



La fusion de deux trous noirs provoque une déformation de l'espace-temps et la propagation d'ondes gravitationnelles (vue d'artiste).

N. R. FULLER / SPL / SUCRÉ SALÉ

La chasse aux ondes gravitationnelles est rouverte

La sensibilité des instruments Ligo et Virgo a été augmentée. Ils seront bientôt épaulés par le détecteur japonais Kagra pour traquer ces vibrations de l'espace-temps.

C'est reparti pour quelques valses de trous noirs et d'étoiles à neutrons. Après trois ans de mise à l'arrêt afin d'améliorer leur sensibilité, les deux détecteurs Ligo aux États-Unis ont repris du service le 24 mai. Ils seront rejoints dans quelques mois par l'instrument franco-italien Virgo installé près de Pise (Italie), et pour la première fois par Kagra, au Japon, en cours d'achèvement. L'astronomie gravitationnelle s'apprête donc à engranger une nouvelle moisson d'observations, selon Sarah Antier, astronome à l'observatoire de la Côte d'Azur, au sein du laboratoire Artémis : « *Depuis la première détection en 2015, 90 fusions (de trous noirs, d'étoiles à neutrons, ou d'un trou noir avec une étoile à neutrons) ont été enregistrées en trois campagnes. Nous espérons cette fois en observer plusieurs chaque semaine, durant vingt mois.* »

Voir la déformation d'étoiles à neutrons

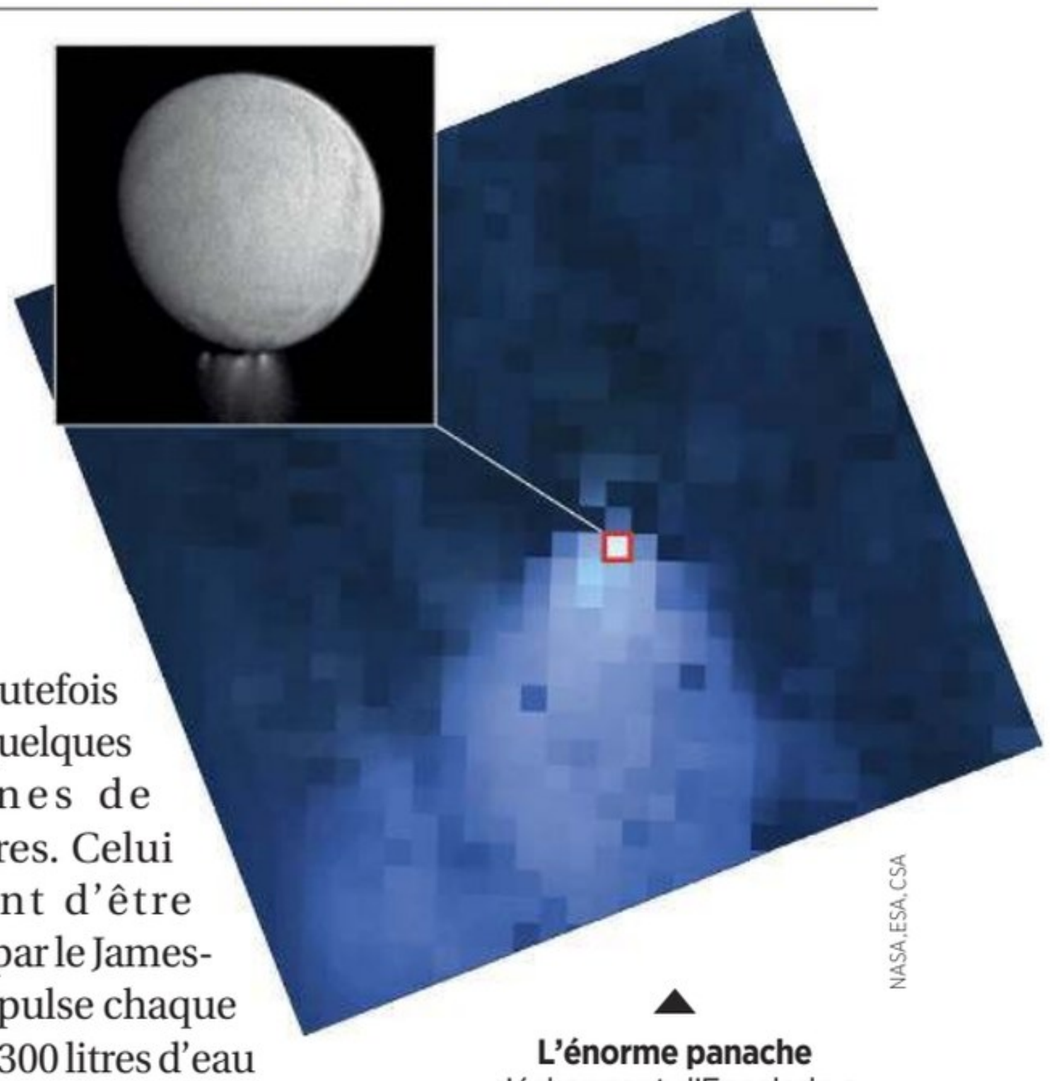
Lorsque deux astres très compacts fusionnent, la quantité d'énergie libérée est telle qu'elle déforme l'espace-temps. Cela génère des ondes gravitationnelles qui se propagent à la vitesse de la lumière. Les détecteurs captent ces infimes contractions de l'espace-temps. Gagner en sensibilité va permettre de voir plus loin dans l'Univers, et donc d'être témoin de davantage d'événements. Ligo pouvait « voir » jusqu'à environ 450 millions d'années-lumière. Désormais, son horizon se porte à 620 millions. Virgo quant à lui devrait passer de 100 à 200 millions. L'analyse de ces collisions renseigne sur les masses qui tournoient l'une autour de l'autre avant de fusionner en trou noir. « *Il s'agit de comprendre comment le nouvel objet compact résultant s'est formé, selon sa masse. Si c'est un trou noir très massif, peut-il résulter de la fusion successive de plusieurs étoiles massives par exemple ? En combien de temps ? Voilà les questions que l'on se pose* », ajoute Sarah Antier. Détecter des collisions lointaines permet aussi de mieux voir celles qui sont proches. « *On mesure avec plus de précision les paramètres de la source, ce qui est d'un grand intérêt en astrophysique. Par exemple, s'il s'agit de la rencontre de deux étoiles à neutrons, nous devrions pouvoir observer la déformation des étoiles lorsqu'elles se rapprochent l'une de l'autre* », conclut Nicolas Leroy, responsable du groupe Virgo au laboratoire IJCLab, à Orsay. ■

F. N.

Des geysers géants jaillissent d'Encelade

Le satellite de Saturne crache de l'eau sur des milliers de kilomètres.

L'équivalent de la distance entre Paris et Tokyo, soit 9 600 km : telle est l'étendue de la colonne d'eau mesurée par le télescope spatial James-Webb, expulsée depuis la surface d'Encelade — satellite de Saturne qui fascine les exobiologistes en raison de l'océan d'eau liquide et salée qu'il abrite sous sa croûte de glace. Dès 2005, la sonde Cassini avait pu en distinguer des dizaines contenant de l'eau mais aussi du méthane, de l'ammoniac, de l'oxygène, du dioxyde de carbone, des sels de sodium et des molécules organiques complexes. Les jets de matière ne s'étendaient toutefois que sur quelques centaines de kilomètres. Celui qui vient d'être observé par le James-Webb expulse chaque seconde 300 litres d'eau dans l'espace… à la vitesse de 540 mètres par seconde ! **F. D.**

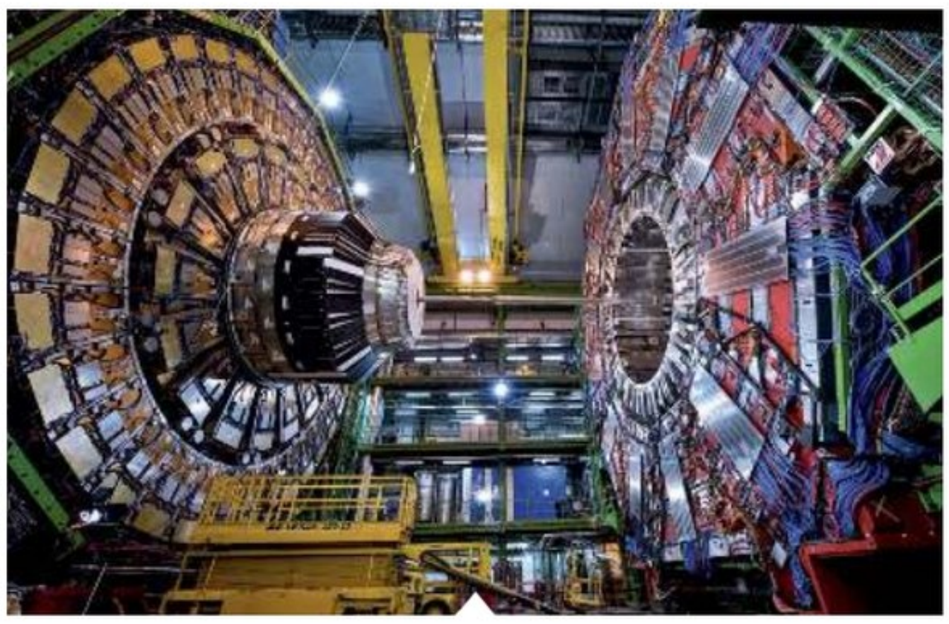


NASA, ESA, CSA

L'énorme panache s'échappant d'Encelade a été observé par le télescope spatial James-Webb.

EN DEUX MOTS

MATÉRIAU Des chercheurs japonais ont construit des maisons avec un béton intégrant 7,6 % de couches-culottes usagées, remplaçant en partie le sable. **PLANÈTE** Saturne est condamnée à perdre ses anneaux : alors qu'ils n'auraient qu'entre 100 et 400 millions d'années, ils devraient avoir disparu dans 100 millions d'années. **ESPACE** Le Royaume-Uni a commencé les travaux d'une future base de lancement de fusées dans le nord de l'Écosse, fer de lance des ambitions spatiales britanniques.



BRIDGEMAN IMAGES

Le détecteur CMS du LHC au Cern, à Genève (Suisse).

L'intrigante désintégration du boson de Higgs

PHYSIQUE Une analyse de mesures, réalisées entre 2015 et 2018 par la collaboration Atlas-CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC), révélerait une désintégration rare du boson de Higgs en un boson Z et un photon. Selon le modèle standard de la physique des particules, elle ne se produirait que dans 0,15 % des cas. Si cette observation était confirmée par la nouvelle campagne de mesures qui commence, et si sa probabilité est supérieure aux prévisions, cela pourrait remettre en cause ce modèle standard. **F. N.**

IL A DIT

« Mon Autopilot a failli me tuer »

Ce témoignage d'un conducteur de Tesla figure parmi des milliers d'autres dans une enquête du journal allemand *Handelsblatt*. Ce dernier a récupéré 100 gigaoctets de documents confidentiels du constructeur automobile américain, dans lesquels les clients remontent des problèmes d'accélération ou d'arrêts d'urgence inexpliqués des voitures, allant parfois jusqu'à l'accident.

Un faux message E.T. à décrypter

CRYPTOGRAPHIE Conçu par des artistes et des scientifiques, un message crypté a été transmis à la Terre par la sonde européenne TGO qui orbite autour de Mars. Intercepté par des télescopes terrestres, il est désormais mis à disposition des internautes. Objectif : « *Entraîner la communauté mondiale […] à réceptionner, décoder et interpréter un éventuel message extraterrestre* », expliquent les organisateurs du projet. À l'heure où nous écrivions ces lignes, le signal — apparemment complexe et non mathématique — n'avait toujours pas été déchiffré. **F. D.**

SETI INSTITUTE

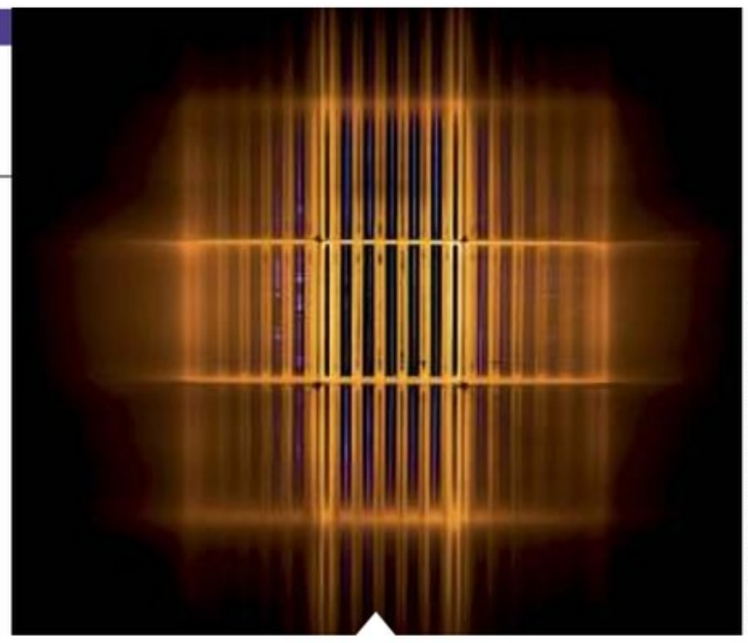
◀ Envoyé depuis l'espace par la sonde TGO, le message a été capté par des télescopes terrestres.

À l'aube de l'horloge nucléaire

PHYSIQUE Au Cern, à Genève, des physiciens ont mesuré avec une précision inouïe la désintégration d'un noyau de thorium-229. Espéré depuis vingt ans, ce résultat ouvre la voie vers une horloge qui pourrait supplanter les horloges atomiques actuelles. Celles-ci enregistrent le passage du temps avec un décalage d'une seconde tous les 30 milliards d'années. À terme, des horloges « nucléaires » pourraient faire dix fois mieux… soit un décalage d'une seconde tous les 300 milliards d'années ! **F. D.**

De l'air ionisé comme barrière antibruit

ACOUSTIQUE Simple, efficace et surtout très compacte, une technologie développée à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) apparaît très prometteuse pour supprimer activement les sons. Elle consiste à ioniser l'air pour créer une fine couche de plasma antibruit. Concrètement, entre deux électrodes séparées par une fine couche d'air, les particules atmosphériques se retrouvent électriquement chargées, à l'état de plasma et interagissent avec les ondes acoustiques jusqu'à les annihiler. Contrairement aux autres dispositifs de réduction active des bruits, celui-ci ne comporte pas de membranes vibrantes, inefficaces pour les hautes fréquences (kilohertz). Et pour les basses fréquences (d'une vingtaine de hertz, par exemple), une couche de plasma de 17 millimètres absorbe aussi bien les sons qu'un mur antibruit de 4 mètres d'épaisseur. ■ **F. D.**



EPFL/LTS2/S. SERGEEV & M. DELAHAYE

La fine couche de plasma générée en ionisant l'air a permis de réduire activement les bruits.

NASA/JPL-CALTECH

À VOIR SUR LE NET

Un robot serpent passe-partout

ROBOTIQUE Cette machine, développée et testée par la Nasa pour explorer les glaces d'Encelade, un satellite de Saturne, peut négocier tous types de terrains difficiles. Sans roues ni membres, le robot rampe sur le sable, la rocaille, la neige, mû par un corps articulé garni d'un filetage comme une vis sans fin. Des capteurs indiquant les propriétés du sol lui permettent de choisir le bon comportement de locomotion. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

THIBAUT LOUIS

QUESTIONS À

Thibaut Louis

Chercheur au Laboratoire de physique des 2 infinis Irène-Joliot-Curie (CNRS-université Paris-Saclay)

« Nos modèles physiques pourraient être à revoir »

Une étude américaine publiée dans la revue *Science* propose une nouvelle méthode pour déterminer la constante de Hubble, soit la valeur du taux d'expansion de l'Univers. Explications.

Quel est le contexte de l'étude ?
La détermination du taux d'expansion de l'Univers, vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres, divise la communauté scientifique. Pour calculer cette constante de Hubble, plusieurs méthodes existent, mais ne donnent pas les mêmes résultats. Or on devrait s'attendre à une valeur unique.

Quelle est l'originalité de ce nouveau calcul ?
Ils ont étudié des images prises à des intervalles différents d'une étoile en fin de vie : la supernova Refsdal. Elle subit un phénomène appelé « effet de lentille gravitationnelle », une situation dans laquelle la propagation de la lumière est déviée par la masse d'un autre corps, en l'occurrence un amas de galaxies. Ces dernières agissent comme une loupe qui amplifie la luminosité de la supernova située en arrière-plan. Cela permet d'en obtenir différentes positions successives et de déterminer ainsi l'allure à laquelle elle se déplace.

Leurs résultats vous convainquent-ils ?
Ils ne permettent pas de trancher, mais ils sont compatibles avec les deux autres méthodes. Mais si l'on ne trouve pas de consensus dans le futur sur cette valeur, alors il nous faudra revoir quelque chose dans nos modèles physiques actuels. ■
Propos recueillis par M. Da P.

Notre satellite abriterait un noyau semblable à celui de la Terre (vue d'artiste).

GÉOAZUR/NICOLAS SARTER

La Lune a bien un noyau solide

SÉLÉNOLOGIE Des géophysiciens apportent des preuves décisives confirmant la structure du noyau de la Lune. L'analyse de son champ de gravité ainsi que les infimes variations de distance entre celle-ci et la Terre est formelle : la Lune abrite une « graine » solide de 516 km de diamètre enveloppée d'un noyau liquide en fusion, comme la Terre. **F. D.**

SOURCE : A. BRIAUD, OBSERVATOIRE DE LA CÔTE D'AZUR, FRANCE.

Cet été,
vivez votre meilleure vie
avec le meilleur des Wifi

Wifi 6E

Dernière génération

Avec l'offre Livebox Max Fibre et la Livebox 6.

Et profitez aussi du service Wifi Sérénité :
jusqu'à 3 Répéteurs Wifi 6 mis à disposition
et un accompagnement personnalisé par un Spécialiste Wifi d'Orange.

orange™

Offre soumise à conditions valable en France métropolitaine sous réserve d'éligibilité et avec équipements compatibles.
Détails sur orange.fr

Le corail possède son propre microbiome

Les prélèvements effectués par la goélette « Tara » dans l'océan Pacifique révèlent une diversité insoupçonnée de micro-organismes.

Le corail « Scolymia » macrophotographié (en vignette) lors d'une plongée au large des îles Tuvalu.

PETE WEST - FONDATION TARA OCEAN

Partie étudier la vie microscopique des récifs coralliens de l'océan Pacifique de 2016 à 2018, la mission Tara Pacific vient de livrer ses résultats et révèle une diversité de micro-organismes insoupçonnée. « *Les récifs coralliens sont les forêts primaires des fonds marins,* rappelle Denis Allemand, codirecteur de la mission. *Leur foisonnement de vie est dû à la symbiose avec des microalgues, mais aussi avec des bactéries et des virus.* » Un constat inédit développé dans l'un des huit articles parus dans *Nature*, exploitant les 68 000 échantillons collectés par la goélette *Tara* sur 99 sites de l'océan Pacifique.

Trois nouvelles bactéries découvertes

Les chercheurs ont montré que la diversité des micro-organismes de ces seuls récifs atteindrait une valeur proche de la diversité totale estimée jusque-là des micro-organismes terrestres — donc probablement sous-évaluée. Ils ont par ailleurs prélevé près de 5400 échantillons de trois espèces de coraux, de deux espèces de poissons et de plancton. Leur séquençage génétique a permis de cartographier la composition du microbiome des récifs et de découvrir trois nouvelles bactéries associées chacune à une espèce de corail. Elles auraient coévolué avec leur hôte, leur fournissant une vitamine B et des acides aminés nécessaires à la survie des coraux.

Une autre étude s'est penchée sur le vieillissement des récifs coralliens, qui peuvent traverser plus de quatre siècles. « *Nous avons étudié les marqueurs de l'état de santé de spécimens présents sur l'ensemble du Pacifique pour évaluer l'état de santé des récifs,* détaille Paola Furla, enseignante-chercheuse à l'université Côte d'Azur. *L'étude a montré que la longévité de deux types de coraux durs est liée à la stabilité et à la robustesse des extrémités télomériques de l'ADN* [un marqueur de vieillissement sensible à l'environnement]. *Les modifications de longueur télomérique sont liées non pas à l'âge mais aux perturbations climatiques passées, notamment aux vagues successives de chaleur et de refroidissement* ». ■ **S. R.**

9,4 millions de km²

La surface couverte par les mousses sur Terre

ÉCOLOGIE Les plantes sans racines du genre *Bryophyta* qui peuplent les forêts et sous-bois recouvrent une surface presque équivalente à celle de la Chine. C'est ce qu'a calculé une équipe qui révèle l'importance de ces mousses pour absorber le carbone et favoriser les écosystèmes. **R. M.**

SOURCE : DAVID ELDRIDGE, UNIVERSITÉ DE SIDNEY, AUSTRALIE.

SIPA

Les buildings de la ville pèsent 764 millions de tonnes.

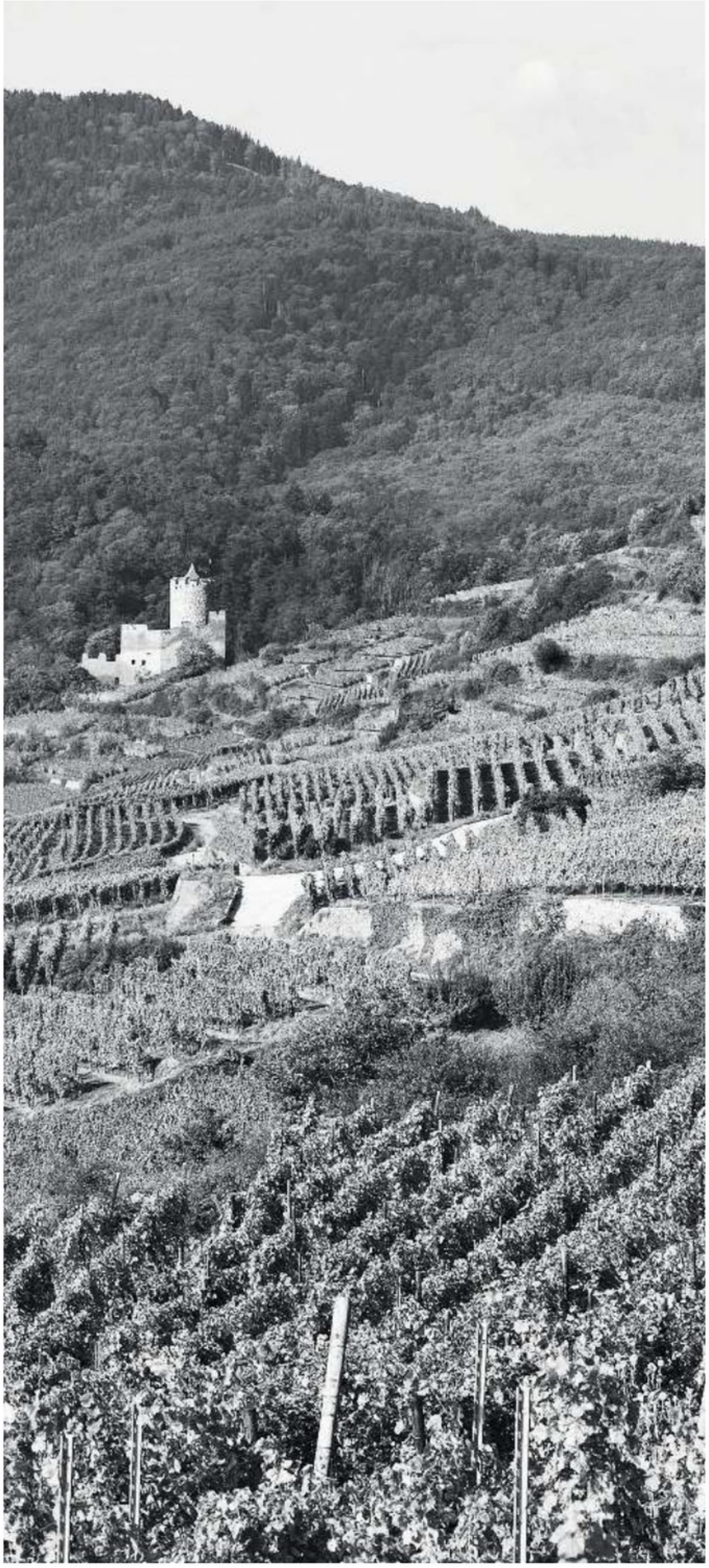
New York s'enfonce sous le poids de ses gratte-ciel

GÉOLOGIE La ville de New York s'affaisse de 1 à 2 mm/an en moyenne, et jusqu'à 4,5 mm par endroits. La cause : les 764 millions de tonnes que pèsent les gratte-ciel de Big Apple, sans compter le poids des infrastructures et de ses 8,4 millions d'habitants. L'affaissement naturel rend la ville plus vulnérable face à la montée des eaux. **N. D.**

SOURCE : STEVEN D'HONDT, UNIVERSITÉ DE RHODE ISLAND, ÉTATS-UNIS.

Mûri au soleil sur une

Dégusté bien frais terrasse



Crédit photo : Zvardon@VinsAlsace

VA VINS ALSACE

Tant de personnalité (s)

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ, À CONSOMMER AVEC MODÉRATION

Les microfibres naturelles irritent les huîtres

POLLUTION Les 2 millions de tonnes de microfibres issues de nos lave-linge affectent la santé des organismes marins. C'est le constat d'une étude qui a mis en contact des huîtres avec des fibres naturelles et synthétiques. Les scientifiques ont constaté que les fibres naturelles (coton, laine) génèrent une inflammation des parois digestives de ces mollusques et affectent leur système immunitaire davantage que les fibres synthétiques. **L. C.**

SOURCE: CAMILLE DÉTRÉE, IFREMER, FRANCE.

2022 CNES / AIRBUS / COPERNICUS

La résolution d'image permet un suivi de chaque arbre (ici au Sénégal).

Les arbres d'Afrique recensés par l'IA

CARTOGRAPHIE Des images par satellite à haute résolution associées à une intelligence artificielle ont permis de cartographier chaque arbre du continent africain, qu'ils soient isolés ou qu'ils fassent partie d'une forêt. La technique a permis de trouver que 30 % de la couverture arborée se situe en dehors des zones forestières, les terres cultivées comptant 433 millions d'arbres. **H. J.**

SOURCE: R. FENSHOLT, UNIVERSITÉ DE COPENHAGUE, DANEMARK.

P. PITTORINO / NATURAGENCY

Le gecko s'installe à Bordeaux

HERPÉTOLOGIE Plus de 250 observations effectuées par les Bordelais eux-mêmes en 2022 confirment l'installation du gecko dans la capitale de Nouvelle-Aquitaine. Aussi appelé la Tarente de Maurétanie, le lézard méditerranéen est bien en train de conquérir le Sud-Ouest, aidé par le changement climatique. Pour voyager, il pond dans l'écorce des oliviers qui font l'objet d'un commerce soutenu à partir de la Méditerranée. **L. C.**

EN DEUX MOTS

CLIMAT Selon de nouvelles projections, la glace de mer en Arctique aura disparu en été d'ici à 2030, soit vingt ans plus tôt que les projections du Giec. **ENVIRONNEMENT** Une étude internationale révèle que les stations de mesure de la qualité de l'air récoltent involontairement de nombreux fragments ADN des espèces animales et végétales environnantes. **SOMMEIL** Des examens d'IRM cérébrale réalisés sur des pigeons indiquent que lorsqu'ils dorment, ces volatiles rêvent… qu'ils volent !

Le réchauffement climatique accroît les turbulences en vol

L'air plus chaud dû aux émissions de CO_2 augmente le cisaillement du vent dans les courants d'altitude.

Dangereuses parce qu'invisibles, les turbulences en ciel clair rencontrées par les avions de ligne sont plus fréquentes qu'il y a quarante ans. C'est le constat publié dans *Geophysical Research Letters* par une équipe de l'université de Reading (Royaume-Uni). L'air plus chaud dû aux émissions de CO_2 tend à accroître le cisaillement du vent dans les courants d'altitude, et donc les secousses à bord. Les mesures effectuées sur un point typique au-dessus de l'océan Atlantique Nord montrent que la durée annuelle totale des fortes turbulences est passée de 17,7 heures en 1979 à 27,4 heures en 2020. Les turbulences modérées sont passées, elles, de 70,0 à 96,1 heures par an. Si les États-Unis et l'Atlantique Nord ont connu les hausses les plus importantes, d'autres itinéraires de vol très fréquentés au-dessus de l'Europe, du Moyen-Orient et de l'Atlantique Sud ont connu une augmentation significative des turbulences. **H. J.**

SHUTTERSTOCK

La fréquence et le nombre de secousses à bord ont nettement augmenté en quarante ans.

« AUJOURD´HUI, LA FINANCE NE PEUT PLUS FAIRE SANS LA SCIENCE ET LE SOUCI DE L'ENVIRONNEMENT » *

Avec des fonds dédiés à la transition environnementale, SWEN Capital Partners se mobilise en faveur de la restauration et de la préservation de la biodiversité. Une approche d'investissement globale, dévoilée par NATURE, la feuille de route climat et biodiversité attachée à sa Politique Finance Durable 2023-2025, et soutenue par des méthodologies de mesures d'impact transparentes, ouvertes et spécifiques à chaque fonds d'impact.

Isabelle Combarel

Quand, en 2014, la société de gestion SWEN Capital Partners (SWEN CP) voit le jour, elle ouvre les yeux sur un monde perçu de plus en plus « écocidaire ». D'emblée, son acte de naissance mentionne la finance durable comme un défi à relever. C'est que, pour Isabelle Combarel, *« le monde de la finance ne peut plus faire comme si la nature était un fonds de ressources inépuisables, à ponctionner à l'envi, sans autre considération que le profit. »* Concentré de convictions, d'engagement et de passion, la jeune société de gestion, atypique dans l'univers du non coté, rassemble alors un collectif d'hommes et de femmes lié-e-s par une expertise financière sûre et par le souci constant d'une finance soutenable. Ensemble, ils travaillent à « changer de paradigme », selon l'expression d'Isabelle Combarel, *« pour faire en sorte que la finance devienne un moyen au service d'un monde plus durable. »*

NATURE, UNE FEUILLE DE ROUTE BIEN-NOMMÉE

Ce changement de paradigme a trouvé un nom : NATURE. NATURE comme le nom de la prestigieuse revue scientifique dans laquelle, en 2009, 26 chercheurs de nombreuses disciplines scientifiques, listent pour la première fois les neuf limites planétaires à ne pas dépasser. Un nom révélateur aussi de la vision qui anime SWEN CP : la finance n'est que ruine de la nature sans le regard éclairé de la science : *« Avec ce mot de NATURE, nous voulons amener toutes nos parties prenantes à questionner les dimensions qu'il englobe, mais aussi les interroger sur les liens que chacune d'entre elles entretient avec l'environnement. Des questionnements cruciaux à l'heure où l'on est sur le point de conférer un statut juridique à la nature. »*

PIONNIER

Si la nature a bientôt des droits, la finance a des devoirs. Ainsi SWEN CP a-t-elle créé des fonds dédiés à la transition énergétique et environnementale. En 2019, le fonds Impact Fund for Transition (SWIFT) est le premier fonds d'infrastructure européen consacré à la thématique des gaz renouvelables. Un lancement pionnier précédé par la création d'un calculateur d'impact des unités de méthanisation. Neuf mois de travail quotidien, avec un cabinet de conseil spécialisé dans les énergies renouvelables : *« En plus de stratégies d'investissement qui aient du sens,* précise Isabelle Combarel, *il nous fallait des métriques qui nous permettent de faire la démonstration de leur bien-fondé. Aujourd'hui, pour chaque nouvel actif financé, une quarantaine d'indicateurs d'impact sont mesurés systématiquement. »*

UN FONDS POUR LES FONDS MARINS

En 2019, SWEN CP procède de la même manière quand, en partenariat scientifique avec l'Ifremer (Institut FRançais de recherche pour l'Exploitation de la MER), elle lance SWEN Blue Ocean, le premier fonds d'investissement « article 9 » consacré à la régénération des océans. Son objectif ? Financer les solutions innovantes de start-ups qui luttent contre la surpêche, la pollution des océans ou encore le dérèglement climatique. Malgré des convictions partagées, il faut d'abord à SWEN CP montrer patte blanche. A son tour d´être évaluée et mesurée sous toutes les coutures : *« Nous avons pris le temps d'apporter les preuves de notre expertise et de la sincérité de notre engagement, montrer qu'il n'était pas une ruse au service de la performance financière mais que nous voulions travailler main dans la main avec la science pour faire en sorte que nos solutions, au service du bien commun, deviennent systémiques. »* Un rituel de passage qui a mené SWEN CP à la création d'un comité d'impact, composé de scientifiques indépendants venus du monde entier. Encore une première : *« Ce comité reçoit une rémunération forfaitaire annuelle, indépendante de la performance financière réalisée par le fonds. Il n'est d'ailleurs jamais consulté sur la dimension financière du fonds. En revanche, pour chaque opportunité d'investissement, c'est lui qui confirme ou infirme les analyses faites par nos équipes d'experts ESG. »*

FAIRE ENSEMBLE

Constituer un écosystème est pour SWEN CP une raison d´ être : Réconcilier tous les univers habitués à travailler en silos, contribuer à une ré-génération, selon le nom donné à l'événement organisé le 22 juin dernier au Trianon, à Paris. Un événement qui a réuni des experts de la finance, des scientifiques et tous les acteurs de l'écosystème SWEN CP, au nom du « faire ensemble » : *« Si nous voulons aller plus vite, et surtout plus loin, nous devons parvenir à embarquer tout notre équipage ; à l'interne, la data, le reporting, la gestion des risques, la conformité réglementaire, les RH ; à l'externe, les 200 sociétés de gestion que nous auditons chaque année. »* A l'heure où le PIB ne peut plus constituer l'unique indicateur de la performance économique et du progrès social, SWEN CP, en chemin vers la société à mission, souhaite partager ses méthodologies de mesures d'impact : *« Nous ne pouvons pas concevoir un monde autrement que soutenable. Nous faisons donc tout pour qu' il advienne. »*

**Isabelle Combarel, Directrice générale adjointe de SWEN Capital Partners, en charge du Développement et de la Finance durable.*

Les radars pourront suivre le déplacement des chiroptères.

L.CAMPBELL/NATUREPL/EBPHOTO

Un algorithme pisteur de chauves-souris

CHIROPTÉROLOGIE Grâce à un nouvel algorithme, BatScan, il est désormais possible aux radars de distinguer dans le ciel nocturne le vol des oiseaux migrateurs de celui des chauves-souris. Cet outil est à la disposition des chercheurs du monde entier pour surveiller et comprendre les migrations saisonnières de ces chiroptères, en particulier à proximité des éoliennes qui sont, rien qu'en France, responsables de 250 000 décès par an. **H. J.**

SOURCE : YUVAL WERBER, UNIVERSITÉ DE HAIFA, ISRAËL.

Avec les chats, il faut allier le geste à la parole

ÉTHOLOGIE Menée dans des bars à chats à Bordeaux et Toulouse, une étude montre que ces félins sont peu réceptifs à la communication vocale seule (le chat est appelé par son nom, mais sans contact visuel). En revanche, ils répondent mieux aux signaux visuels seuls. L'idéal étant d'associer le geste à la parole pour — tenter — d'attirer leur attention. **A.-S. T.**

SOURCE : CHARLOTTE DE MOUZON, UNIVERSITÉ PARIS-NANTERRE, FRANCE.

PLAINPICTURE

Les plantes réagissent quand on les touche

BOTANIQUE Bien que dépourvues de système nerveux, les plantes sont sensibles au toucher. Pour la première fois, en travaillant sur l'arabette des dames et des plants de tabac, une équipe de biologistes a pu identifier les messages moléculaires circulant lorsqu'on caresse une plante, mais aussi lorsque le contact cesse, dévoilant une sensibilité plus fine encore qu'on ne le pensait. **H. J.**

SOURCE : ALEXANDER HOWELL, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

À l'écoute du Pando

DENDROLOGIE Aux États-Unis, dans le centre de l'Utah, le Pando, immense colonie clonale de 47 000 peupliers faux-trembles, a été mis sur écoute à l'aide d'hydrophones placés au contact des racines de l'un d'entre eux. Les sons se répercutent dans toute la colonie à travers leur système racinaire commun. Ce projet artistique mené par l'association Friends of Pando (Les amis du Pando) a révélé un potentiel scientifique insoupçonné pour ausculter la santé de ce qui est à ce jour l'un des organismes les plus anciens et étendus sur Terre. À écouter pour le plaisir sur sciav.fr/917pando. **H. J.**

GETTYIMAGES

Les 47 000 peupliers faux-trembles du Pando (États-Unis) partagent le même système racinaire.

A.LOPEZ

QUESTIONS À

Alfredo López,

chercheur adjoint à l'université d'Aveiro (Portugal), membre du Grupo de trabajo Orca Atlántica (GTOA)

Quand les orques attaquent des bateaux

Ces dernières années, au large des côtes portugaise et espagnole, plusieurs navires ont été abîmés par une sous-population d'orques adoptant un comportement brutal et inédit à l'égard des bateaux. Alfredo López est l'auteur d'une étude sur cet intrigant phénomène.

Comment interprétez-vous ce comportement ?
Ces orques ne veulent pas blesser des humains. Mais il est très difficile de saisir pourquoi elles foncent ainsi dans les bateaux. Une de nos hypothèses est qu'il pourrait s'agir d'un comportement aversif en réponse à une mauvaise expérience. Elles tenteraient de stopper le bateau pour ne pas répéter cet épisode.

Constate-t-on une augmentation de ces interactions ?
Ces événements ont commencé en juillet 2020, et leur fréquence a augmenté jusqu'en 2021. Depuis cette date, il n'y a pas eu d'augmentation significative de ces attaques d'orques ciblant des bateaux.

Comment réagir lorsqu'une orque approche un navire ?
Nous savons que la vitesse du navire est une motivation. Nous avons donc proposé un protocole de sécurité consistant à arrêter le navire afin d'éviter de les tenter. Ce protocole ne fonctionne pas toujours, mais il est utile dans 60 % des cas. Il faut également prévenir les autorités et transmettre les informations utiles à notre groupe de travail (Grupo de trabajo Orca Atlántica), qui seront ensuite mises à disposition des marins pour qu'ils adaptent leur sortie. ■

Propos recueillis par A.-S. T.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

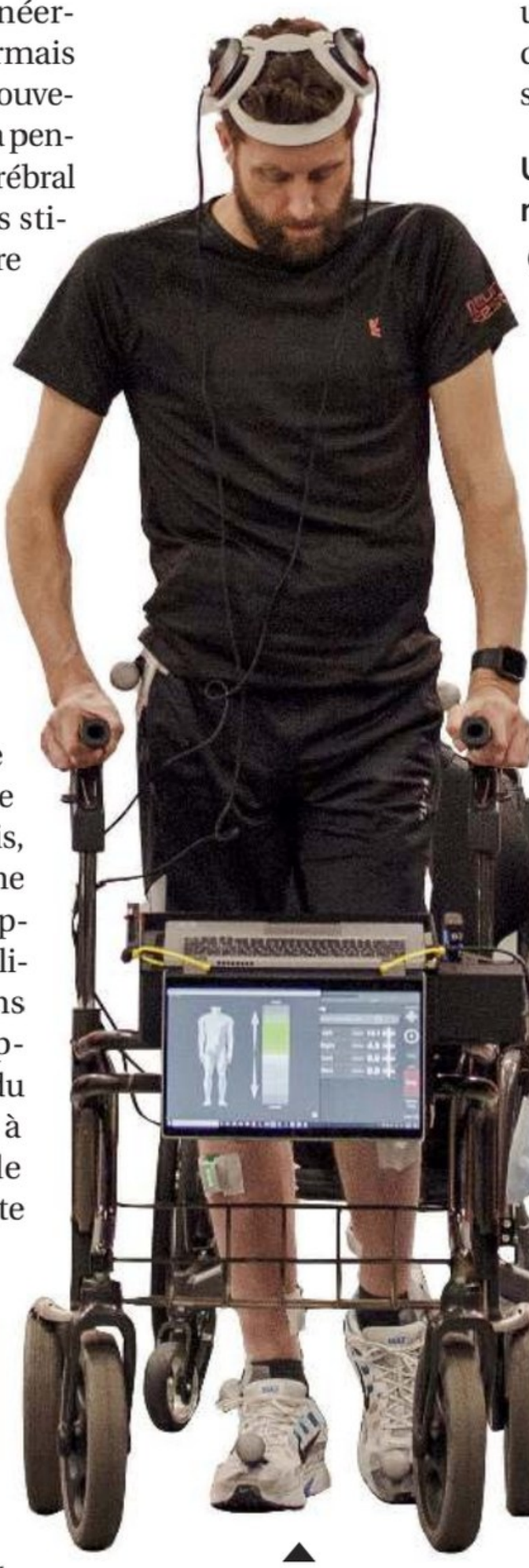
S&A0623

Un paraplégique retrouve son autonomie

Pour réaliser cet exploit, un implant cérébral qui lit l'activité neuronale a été couplé à des électrodes stimulant la moelle épinière lésée.

Paralysé après une chute à vélo, un patient néerlandais peut désormais contrôler à nouveau le mouvement de ses jambes par la pensée grâce à un implant cérébral couplé à des électrodes stimulant sa moelle épinière lésée. « *Ce n'est pas une amélioration, c'est un changement radical de concept* », insiste Grégoire Courtine. Depuis 2018 en effet, l'équipe du neuroscientifique à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) a testé avec succès sur plusieurs patients son dispositif de stimulation électrique de la moelle. Mais cette fois, celui-ci a été associé à une autre technologie développée en 2018 au centre Clinatec de Grenoble, dans l'Isère : un implant captant l'activité cérébrale du cortex moteur de façon à permettre au patient de contrôler un exosquelette par la pensée.

Les deux équipes ont ainsi collaboré pour concevoir le premier système de stimulation électrique de la moelle épinière contrôlé par la pensée. « *Toute la différence est dans le contrôle de la stimulation* », explique Gert-Jan, premier patient à utiliser le double système, et qui avait auparavant testé la stimulation de la moelle seule.



EPFL/NEURORESTORE

Gert-Jan marche en pilotant ses jambes par la pensée.

Un contrôle naturel du mouvement des jambes

Concrètement, l'implant cérébral envoie les signaux captés à un processeur qui les analyse pour prédire les intentions de l'utilisateur grâce à des algorithmes. Ces prédictions sont ensuite transmises — sans fil — à un dispositif implanté dans l'abdomen du patient, qui va activer les électrodes disposées sur la moelle épinière pour la stimuler. Tout ce cheminement, depuis le cortex moteur jusqu'à la colonne vertébrale, se fait en moins de 500 millisecondes, permettant, selon Gert-Jan, un contrôle naturel des mouvements de ses jambes. Un système en partie intégré au déambulateur du patient pour être utilisé en autonomie à domicile. « *J'ai pu par exemple repeindre les murs chez moi en étant debout* », témoigne, enthousiaste, Gert-Jan, qui a bénéficié du système durant sept mois. ■ **N. G. C.**

13,37 cm

La taille record du plus gros calcul rénal

CHIRURGIE Des médecins militaires sri-lankais ont retiré le plus gros et le plus lourd calcul rénal jamais observé chez un soldat retraité de 62 ans. Cette sorte de pierre formée par des sels minéraux s'étant accumulés dans le rein pesait 801 grammes. Soit plus de cinq fois le poids moyen d'un rein masculin. **H. J.**

G. HAVENITH, LOUGHBOROUGH UNIVERSITY.

La texture capillaire a été testée sur un mannequin thermique.

Les cheveux frisés protègent de la chaleur

BIOLOGIE Une étude menée sur le rôle que les textures des cheveux humains jouent dans la régulation de la température corporelle révèle que les cheveux bouclés protègent mieux de la chaleur et de la déshydratation. Pour en avoir le cœur net, les scientifiques ont utilisé un mannequin thermique simulant les variations de température corporelle et des perruques en cheveux humains de différentes textures. **H. J.**

SOURCE : TINA LASISI, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS

Une peau artificielle aussi sensible qu'une vraie

BIOMÉCATRONIQUE Conçue pour équiper des prothèses, cette peau électronique ne mesure que quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur, plus fine qu'une vraie (entre 1,5 et 4 mm). C'est assez pour intégrer des transistors souples capables de capter des sensations de température ou de pression. Testée *in vivo* chez le rat, cette « e-skin » a converti les *stimuli* en signaux électriques avant de les transmettre avec succès à des électrodes implantées dans le cerveau des rongeurs. **H. J.**

SOURCE : WEICHEN WANG, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.

BAO RESEARCH GROUP/STANFORD UNIVERSITY

Les infarctus les plus sévères surviennent le lundi

CARDIOLOGIE **L'analyse des données de 10 528 patients admis entre 2013 et 2018 en Irlande pour le type le plus sévère de crise cardiaque montre que ces infarctus se produisent majoritairement le premier jour de la semaine. Selon les chercheurs, la cause serait à chercher du côté du déséquilibre du rythme circadien induit par le week-end.** **H. J.**

SOURCE : J. LAFFAN, BELFAST HEALTH AND SOCIAL CARE TRUST, IRLANDE.

Une bio-glue pour stopper les hémorragies

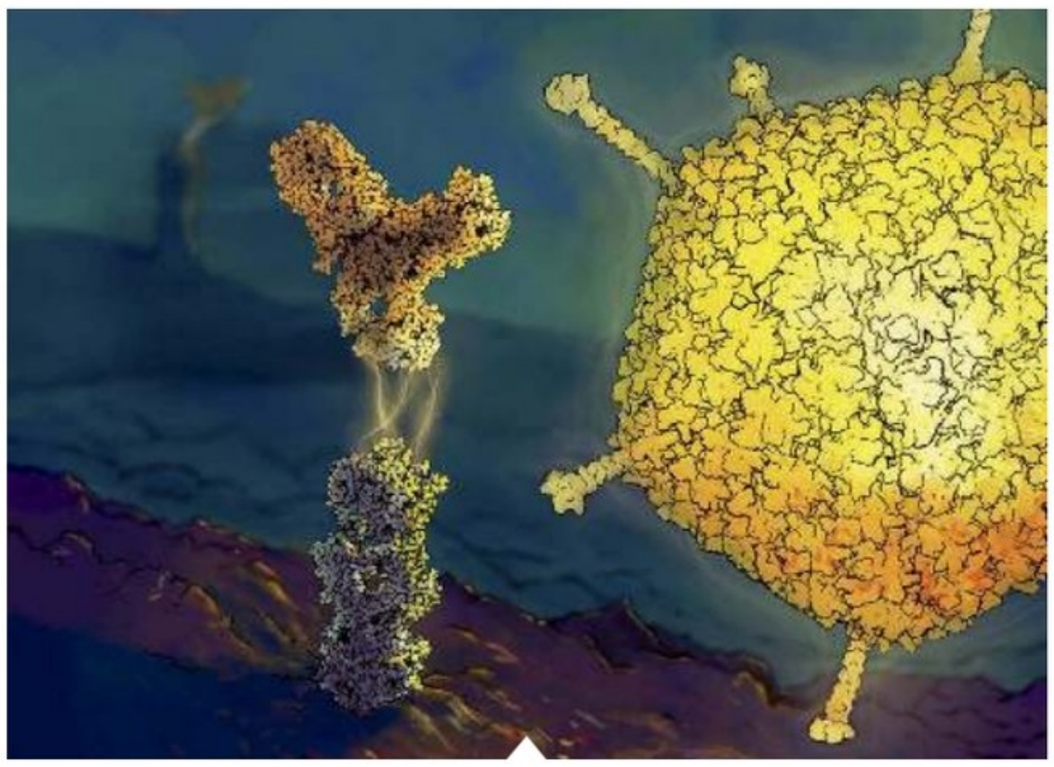
CHIRURGIE Mise au point au Massachusetts Institute of Technology (États-Unis), une colle chirurgicale s'est montrée plus efficace pour stopper les hémorragies récalcitrantes que les sutures et autres agents de contrôle des saignements. Bio-inspirée de la colle des balanes, de petits crustacés, la technologie repose sur un cocktail breveté de polymères déjà utilisés dans les dispositifs médicaux et donc considérés comme sûrs. **H. J.**

STOCK PHOTO

La colle chirurgicale s'inspire de celle des balanes.

Des traitements prometteurs contre le glioblastome

Le pronostic de patients atteints de cette tumeur cérébrale, qui tue environ 3500 personnes par an en France, a été amélioré dans deux nouveaux essais.



TAL BAVLI

Un virus « oncolytique » associé à un anticorps (illustration) a été injecté dans le cerveau de patients dans l'un des deux essais.

Deux traitements inédits contre le glioblastome, cancer du cerveau le plus courant, ont donné des résultats prometteurs. Le premier, piloté par l'hôpital universitaire de Zurich (Suisse), a porté sur cinq patients. Il utilisait un anticorps innovant, reconnaissant les néovaisseaux sanguins formés par la tumeur, couplé à une molécule anticancéreuse de l'organisme et une chimiothérapie classique. Après neuf mois, la tumeur était éliminée chez un patient, très réduite chez un autre et stabilisée chez les trois derniers.

Dans le même temps, un essai américano-canadien a utilisé une autre approche : un anticorps capable de réactiver le système immunitaire a été associé à un virus dit oncolytique, le DNX-2401, génétiquement modifié pour cibler les cellules tumorales, et injecté dans le cerveau de 42 patients. Cinq d'entre eux ont bien répondu au traitement, dont trois étaient encore en vie quatre ans plus tard. Un gain important pour ce cancer agressif dont le traitement classique permet une survie d'environ quinze mois seulement. **P. K.**

ELLE A DIT

« Notre étude ouvre la voie à l'utilisation de la stimulation bi-sensorielle personnalisée comme traitement efficace des acouphènes, donnant de l'espoir à des millions de personnes »

Susan Shore, professeur d'ORL à l'université du Michigan (États-Unis) à propos des résultats prometteurs d'un essai mené sur 100 patients, exploitant une combinaison de *stimuli* sonores et tactiles pour atténuer ces sons fantômes handicapants.

GÉRARD LACZ/ REX FEATU/REX/SIPA

Quand le gel douche attire les moustiques

DERMATOLOGIE La composition de notre savon ou gel douche tend souvent à rendre notre peau plus appétissante pour les moustiques. C'est ce que montre une expérience menée sur quatre courageux volontaires avec quatre gels douche différents. Si l'empreinte olfactive de certains participants attirait naturellement plus les moustiques que les autres *(lire aussi p. 114)*, la peau semblait encore plus alléchante avec trois des savons testés (Dial, Dove et Simple Truth). Seul celui contenant de la noix de coco (Native) semblait avoir un léger effet répulsif. **C. L.**

SOURCE : MORGEN VANDERGIESSEN, VIRGINIA TECH, ÉTATS-UNIS

Une dose de vaccin suffit contre le cancer du col de l'utérus

L'enjeu est maintenant de généraliser la couverture vaccinale dans les pays en développement.

C'est une excellente nouvelle qui se dégage des campagnes vaccinales menées contre les papillomavirus dans nombre de pays occidentaux : une seule dose de vaccin — au lieu des deux voire trois injections actuellement recommandées — suffit pour protéger jeunes filles et jeunes garçons contre cette famille de virus à l'origine de cancers du col de l'utérus, du pénis, de la vulve, du vagin et de plus en plus de la gorge, notamment chez les hommes.

Alors que les pays ayant résolument vacciné leur population depuis 2006 ont vu le nombre de cancers du col de l'utérus s'effondrer, l'enjeu est maintenant de généraliser la couverture vaccinale dans les pays en développement, qui concentrent 90 % des décès. Jusqu'à présent, la nécessité d'au moins deux doses de vaccin impliquait des infrastructures développées, des dépenses importantes pour l'achat et la mise en œuvre de campagnes vaccinales, ainsi que l'observance du schéma vaccinal par les familles. La vaccination avec une seule dose devrait aussi faciliter son extension aux garçons, dont la couverture vaccinale est encore trop faible dans tous les pays. **P. K.**

VOISIN/PHANIE VIA AFP

En France, la vaccination est recommandée dès 11 ans chez les filles et les garçons.

Les ressorts cérébraux de l'humour

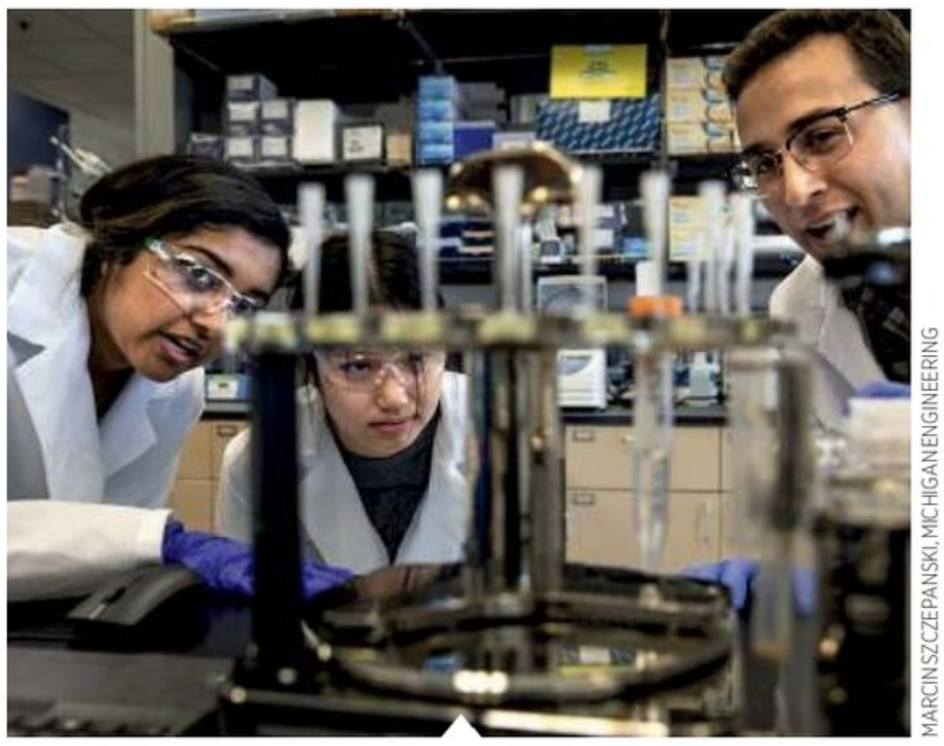
NEUROSCIENCES Pour identifier une signature cérébrale spécifique de l'humour, une équipe franco-israélienne a étudié l'activité neuronale de patients pendant qu'ils visionnaient des séquences de films de Charlie Chaplin. Ils montrent que les scènes les plus drôles étaient liées à une augmentation des ondes gamma à haute fréquence dans le lobe temporal, témoignant d'un fort engagement cognitif et marquant l'appréciation de l'humour. **N. D.**

SOURCE : LIONEL NACCACHE, INSTITUT DU CERVEAU, FRANCE

L'antibiotique imparable

BACTÉRIOLOGIE En plus d'être très efficace contre les bactéries à Gram positif comme le staphylocoque doré, un nouvel agent antibiotique isolé d'une bactérie rare du sol, la clovibactine, présente un mécanisme « anti-évolution » inédit. En se fixant à une partie spécifique des lipides bactériens à la surface de la membrane, elle rendrait l'émergence d'une résistance aux antibiotiques par mutation quasi impossible. **P. K.**

SOURCE : MARKUS WEINGARTH, UNIVERSITÉ D'UTRECHT, PAYS-BAS



MARCIN SZCZEPANSKI, MICHIGAN ENGINEERING

L'automate piloté par le logiciel BacterAI effectue des tests, à l'instar d'un laborantin.

Cette IA effectue 10 000 expériences par jour

MICROBIOLOGIE Trouver la bonne formule d'acides aminés pour la croissance d'une bactérie donnée est possible avec un programme d'apprentissage profond, montrent des chercheurs américains. Le logiciel, baptisé BacterAI, détermine de façon autonome 336 types de tests par jour et pilote 11 automates chargés de faire les cultures bactériennes. Il est ainsi capable de mener jusqu'à 10 000 expériences par jour. **P. K.**

SOURCE : ADAM DAMA, UNIVERSITÉ DE L'ILLINOIS, ÉTATS-UNIS.

hellio

Jusqu'à **60 %** d'économies d'énergie

Baissez vos factures d'électricité en installant des panneaux solaires

Produisez une énergie 100 % renouvelable et locale chez vous grâce au photovoltaïque

Simulez votre projet
particulier.hellio.com
ou au 01 87 66 61 93

Avis Vérifiés
★★★★☆ 4,2/5
sur 4 490 avis

Votre énergie a de l'impact

hellio

PARCO ARCHEOLOGICO DI POMPEI PRESS OFFICE / AFP

Les premières analyses des squelettes montrent qu'il s'agissait de deux hommes âgés d'au moins 55 ans.

Deux nouvelles victimes découvertes à Pompéi

Régulièrement, le site enseveli par l'éruption du Vésuve livre des vestiges humains qui témoignent de la violence de la catastrophe.

Le site de Pompéi a beau être fouillé en long, en large et en travers depuis le XVIIIe siècle, il n'en finit pas de fournir de nouveaux vestiges aux archéologues. Dernière trouvaille en date : deux nouvelles victimes de l'éruption du Vésuve, qui dévasta la région en l'an 79 de notre ère. Ces dernières, qui furent comme des milliers d'autres frappées par la violence de l'éruption, mais aussi par le tremblement de terre que celle-ci déclencha, ont été sorties de terre lors de fouilles réalisées dans l'Insula dei Casti Amanti, ou Insula des chastes amants — sorte d'immeuble collectif. À l'état de squelettes, les deux corps ont été découverts couchés sur le côté, dos à dos, mais à distance l'un de l'autre, avec une main sur la tête, dans une pièce de service où ils s'étaient vraisemblablement réfugiés. Sur les dépouilles, cinq éléments en pâte de verre identifiables comme des fermoirs de colliers et six pièces de monnaie ont également été trouvés : deux deniers en argent, dont un républicain datable du milieu du IIe siècle avant J.-C., et quatre en bronze frappées sous le principat de Vespasien et donc plus récentes.

Des traumatismes dus à l'effondrement d'un mur

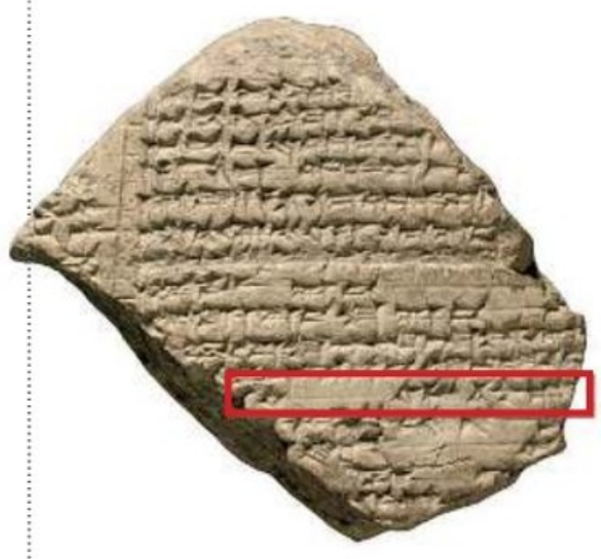
« *Les premières analyses anthropologiques sur le terrain indiquent que les deux individus sont probablement morts de traumatismes multiples causés par l'effondrement de certaines parties du bâtiment* », indique l'équipe du parc archéologique, précisant qu'il s'agissait de deux hommes âgés d'au moins 55 ans qui portaient sur eux quelques monnaies.

L'état d'un mur à proximité démontre la force des tremblements de terre liés à l'éruption : « *Toute la partie supérieure s'est détachée et est tombée dans la pièce, écrasant et ensevelissant l'un d'eux.* » Autrement dit, ils ne sont pas morts en raison des courants pyroclastiques qui ont balayé la ville, mais des conséquences du séisme. Soit l'une des causes les plus représentées parmi les quelque 3000 victimes de la catastrophe qui tua, au total, 15 à 20 % de la population de la cité antique. ■ **M. B.**

35,3 millions d'euros

Le prix de vente du codex Sassoon

PALÉOGRAPHIE La Bible hébraïque du Xe siècle *(lire* S. et A. *n° 916)*, qui concourait pour devenir le texte le plus cher vendu aux enchères, n'a finalement pas dépassé l'édition de la Constitution américaine, vendue 43,2 millions de dollars en 2021. L'acquéreur, Alfred H. Moses, a fait don du manuscrit au Musée du peuple juif à Tel-Aviv (Israël). **H. J.**



G. GUTHERZ ET AL. THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

La traduction de la ligne par l'IA : « S'il nettoie ses vêtements, ses jours seront longs ».

Une IA experte du cunéiforme

ARCHÉOLOGIE Un algorithme est capable de lire l'écriture cunéiforme des tablettes de l'ancienne Mésopotamie et de les traduire en anglais de façon automatisée. Un véritable défi, car les signes de cette écriture apparue au IVe millénaire avant J.-C. peuvent se lire de diverses manières. **S. de L.**

SOURCE : GAI GUTHERZ, UNIVERSITÉ DE TEL-AVIV, ISRAËL.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs chaque jeudi de 17H30 à 19H sur https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !	plus de 160 000 followers	plus de 163 000 instagrammeurs	Plus de 7 000 abonnés professionnels	plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Le grand melting-pot africain de « sapiens »

Des lignées d'« Homo » se sont mélangées pendant des dizaines de milliers d'années avant la sortie d'Afrique.

PHOTO PHILIPPE PLAILLY, RECONSTITUTIONS ELISABETH DAYNES / LOOKAT SCIENCES

Représentation des différentes espèces d'hominidés.

« *Contrairement à ce que l'on pensait, notre espèce n'a pas évolué dans un seul endroit, ou de manière isolée à partir d'une seule lignée* », estime Aaron Ragsdale de l'université du Wisconsin-Madison (États-Unis), un des auteurs d'une étude internationale publiée dans *Nature*. Il y aurait plutôt eu une sorte de *melting-pot* entre lignées divergentes d'*H. sapiens*. Les données génomiques les plus complètes jamais étudiées des populations africaines modernes montrent en effet qu'au moins deux branches évolutives d'*H. sapiens* se sont séparées, il y a entre 120 000 à 135 000 ans, mais ont continué à se mélanger pendant des dizaines de milliers d'années avant que notre espèce n'entame sa sortie d'Afrique. Ce travail réfute en revanche l'hypothèse selon laquelle notre diversité génétique actuelle s'expliquerait par des accouplements de nos ancêtres avec une espèce archaïque qui n'aurait pas encore été découverte. **R. M.**

ATLANTIC PRODUCTIONS/MAGELLAN

À VOIR SUR LE NET

L'épave du « Titanic » se dévoile

IMAGERIE Experte de la cartographie en haute mer, la société Magellan a réalisé le premier scan numérique grandeur nature du *Titanic*. Plus de 700 000 images ont été prises sous tous les angles par des submersibles télécommandés qui ont sillonné l'épave plus de 200 heures pour fournir cette vue 3D unique de l'ensemble du fameux navire coulé en 1912. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

L'IA à la découverte des géoglyphes de Nazca

TECHNOLOGIE Après avoir consacré cinq années à analyser des images par satellite des géoglyphes de Nazca, au Pérou — en découvrant près de 150 nouvelles figures —, une équipe japonaise a confié cette tâche à un programme d'apprentissage profond (*deep learning*). La phase de test se révèle probante, l'IA ayant identifié quatre géoglyphes encore inconnus *(illustration ci-contre)* et qui auraient été difficilement décelables à l'œil nu, selon les chercheurs. **S. De L.**

YAMAGATA UNIVERSITY

SOURCE : MASATO SAKAI, UNIVERSITÉ DE YAMAGATA, JAPON.

L'Empire romain sentait le patchouli

ARCHÉOLOGIE **Pour la première fois, la composition chimique d'un parfum romain créé il y a plus de 2000 ans a pu être déterminée. Retrouvé en 2019 dans la ville andalouse de Carmona, dans un flacon à onguent resté hermétiquement clos pendant deux millénaires, le parfum a été identifié comme de l'essence de patchouli, une plante toujours utilisée en parfumerie, caractérisée par une puissante odeur boisée et camphrée. C'est la première fois que cette fragrance est détectée dans un contexte romain.** **S. De L.**

SOURCE : DANIEL COSANO, UNIVERSITÉ DE CORDOUE, ESPAGNE.

La peste, une histoire mondiale

ÉPIDÉMIES Depuis les fausses pestes de l'Antiquité jusqu'aux réservoirs actuels, en passant par la peste noire qui tua au XIVe siècle deux Européens sur trois… L'histoire mondiale de la peste se dévoile dans un numéro passionnant du magazine *L'Histoire* (édité comme *Sciences et Avenir-La Recherche* par les éditions Croque Futur). Un dossier spécial qui bénéficie des plus récents apports de l'archéo-génétique — avec Patrick Boucheron en vedette, qui y a consacré son cours au Collège de France. En vente tout l'été chez votre marchand de journaux. **M. N.**

Le plus vieux baiser du monde

ANTHROPOLOGIE La plus vieille trace de baiser romantique connue remonte à… 4500 ans ! Soit 1000 ans plus tôt que ce qui était jusqu'ici reconnu par la communauté scientifique. L'analyse de textes issus des premières sociétés mésopotamiennes montre qu'il était déjà une pratique courante au Moyen-Orient à cette époque. Les scientifiques jugent toutefois que le baiser a probablement une histoire bien antérieure, puisqu'il existe chez certains de nos cousins primates. **N. D.**

SOURCE : SOPHIE LUND RASMUSSEN, UNIVERSITÉ D'OXFORD, ROYAUME-UNI.

THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

Cette tablette mésopotamienne datant de 1800 avant J.-C. montre un couple qui s'embrasse.

Aux origines françaises du Québec

PALÉOGÉNÉTIQUE La plupart des premiers Français arrivés au Québec au XVII^e siècle venaient des régions portuaires du Poitou et de Normandie, ainsi que d'Île-de-France. C'est ce que montre une analyse des données génétiques et généalogiques de plus de 20 000 Canadiens francophones, dont l'immense majorité descend directement des premiers colons français qui ont accosté sur les rivages du fleuve Saint-Laurent. **N. G. C.**

SOURCE : SIMON GRAVEL, UNIVERSITÉ MCGILL, CANADA

SAMUEL SÁNCHEZ / EL PAÍS

Deux des têtes sculptées mises au jour en Espagne.

Les tartessiens ont enfin un visage

ARCHÉOLOGIE Cinq reliefs de têtes, dont deux de femmes arborant d'opulentes boucles d'oreilles, ont été découverts sur le site de Casas del Turuñuelo dans le sud de l'Espagne, qui témoigne de l'existence de la civilisation antique de Tartessos au I^er millénaire avant notre ère. Les archéologues, en effet, en étaient venus à penser que cette civilisation, longtemps considérée comme mythique, ne représentait pas les visages humains. **S. De L.**

NASA/SWIFT/CRUZ DEWILDE - UC BERKELEY - MAX PPP - BIOSP

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

ASTRONOMIE

Le plus brillant sursaut gamma livre ses premiers secrets

Trois astronomes décryptent l'extraordinaire phénomène capté le 9 octobre 2022 par une armada de télescopes qui ont livré une moisson de données sur cette colossale bouffée de photons. À lire sur le site de *La Recherche*.
https://bit.ly/917gamma

NEUROSCIENCES

Les Twitch de « Sciences et Avenir » en replay

Plaisir et douleur étaient à l'honneur du dernier Twitch de *Sciences et Avenir*. Invité spécial, le Dr Amaury François, chercheur à l'Institut de génomique fonctionnelle de Montpellier, y décrypte les secrets neurologiques du toucher, agréable ou repoussant. sciav.fr/917twitch

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

Un robot jardinier qui a la main verte

L'université américaine de Berkeley dévoile en vidéo un jardinier automatique plus efficace que des experts en horticulture, et plus économe en eau…
sciav.fr/917jardinier

5 minutes

Menhirs de Carnac : l'enquête se poursuit

Depuis que 38 menhirs ont été détruits à Carnac pour laisser place à un magasin, l'émotion est vive. Un précieux patrimoine a-t-il été sacrifié ? Enquête.
sciav.fr/917carnac

10 minutes

Plongée dans les prémices de l'onanisme

Commencée il y a 40 millions d'années, l'histoire évolutive de la masturbation chez les primates, reconstruite pour la première fois, révèle d'étonnants résultats.
sciav.fr/917onanis

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

DOSSIER

Spécial EAU

L'eau est au cœur des préoccupations climatiques, géopolitiques, scientifiques et sociales. Afin de mieux comprendre les menaces qui pèsent sur cette ressource vitale, la rédaction de « Sciences et Avenir-La Recherche » s'est mobilisée pour concevoir ce dossier spécial de 50 pages.

SOMMAIRE

INTRODUCTION
Les 7 propriétés de l'eau p. 30

SCÉNARIOS
L'énigme de l'origine de l'eau s'éclaircit p. 35

DATA
L'eau dans le monde et en France p. 40

INFOGRAPHIE
Voici le véritable cycle de l'eau p. 42

ESPACE
Un satellite dévoile le monde des lacs, rivières et océans p. 44

RESSOURCE
La guerre de l'eau a commencé p. 46

AGRICULTURE
Des innovations pour cultiver mieux avec moins d'eau p. 53

ÉCONOMIE
Quel prix donner à l'eau ? p. 56

CLIMAT
L'ère annoncée des inondations catastrophiques p. 60

HYGIÈNE
Eau potable : la menace des polluants p. 64

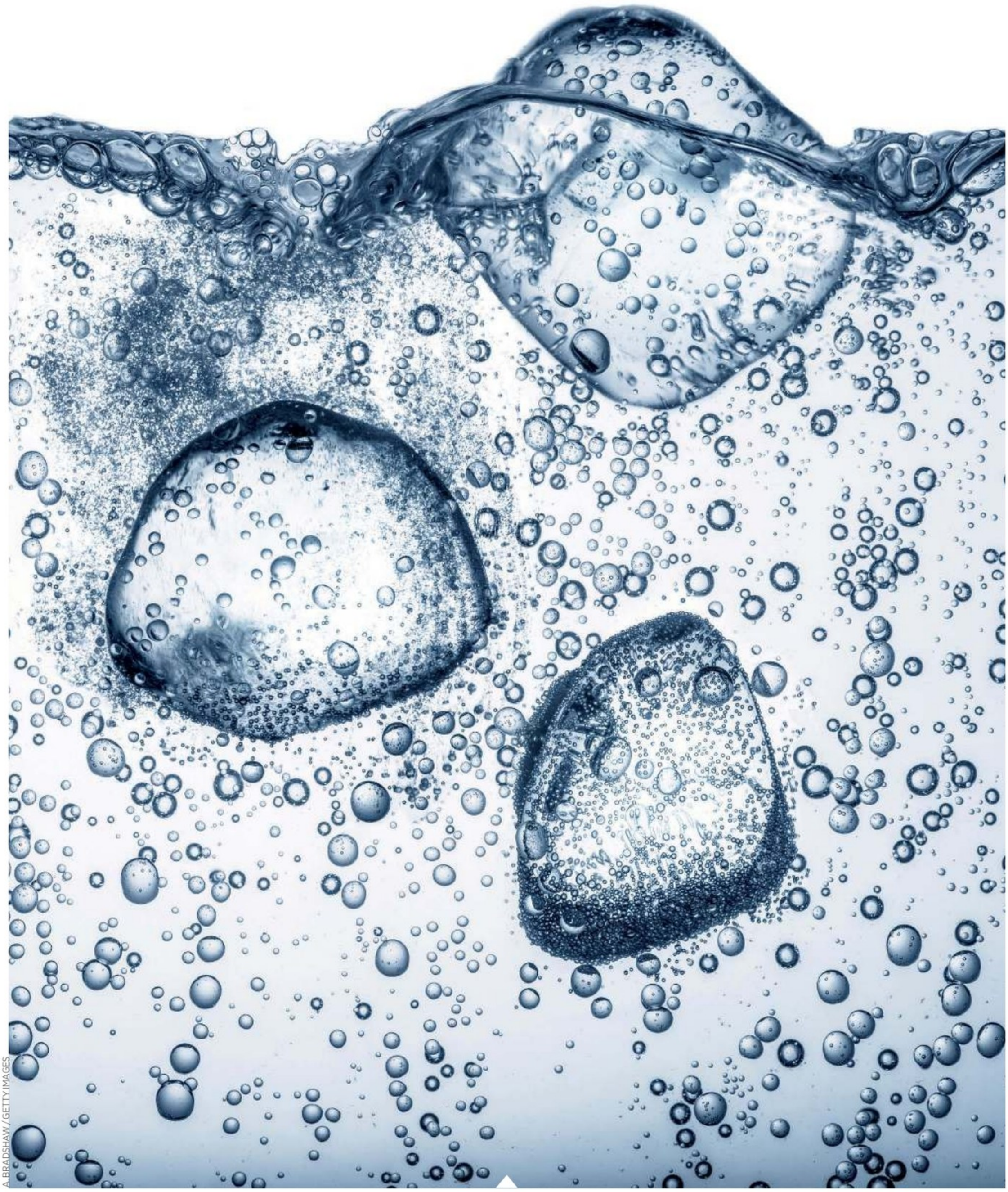
LOISIR
L'heure de vérité pour la baignade dans la Seine p. 68

SANTÉ
Les vertus thérapeutiques de l'eau p. 71

CROYANCES
Un objet de fantasmes et d'arnaques p. 74

HISTOIRE
Comment est née l'attirance pour l'eau p. 77

TEGUH SANTOSA/ GETTY IMAGES



A. BRADSHAW / GETTY IMAGES

Contrairement aux autres matériaux, lorsque la température atteint 0 °C, l'eau liquide devenue solide voit son volume croître et sa densité se réduire, ce qui explique que les glaçons — comme les icebergs — flottent. C'est une des propriétés exceptionnelles de l'eau.

Les 7 propriétés exceptionnelles de l'eau

Trois atomes seulement : un d'oxygène combiné à deux d'hydrogène. La formule chimique de l'eau est bien connue, mais ses propriétés physiques ne cessent d'émerveiller les spécialistes. Comment une molécule aussi simple peut-elle être un tel casse-tête ? Il n'en fallait pas moins pour le berceau de la vie.

La formule chimique de la molécule d'eau est sans doute la plus célèbre de toutes. En raison du caractère vital et si familier de cette ressource, d'abord ; et parce qu'elle est aussi l'une des plus simples qui soit ! Trois atomes seulement : un d'oxygène (O) combiné à deux d'hydrogène (H), ce dernier élément étant lui-même le plus basique et le plus abondant de l'Univers. Pourtant, lorsque ces molécules se présentent en grand nombre et interagissent, au fond d'un lac ou dans un vulgaire glaçon, elles forment un matériau aux propriétés complexes, paradoxales, « *dont certaines ne sont pas encore totalement comprises et suscitent une importante activité de recherche* », signale Frédéric Caupin, professeur à l'université Claude-Bernard Lyon 1. Les scientifiques ont identifié ainsi de nombreuses situations où l'eau se comporte de façon étrange, singulière. « *Elle n'est certes pas la seule substance à présenter de telles anomalies,* observe le physicien. *Mais c'est elle qui en cumule le plus, faisant de l'eau un matériau aussi exceptionnel que fascinant, intimement associé à la vie.* »

1 Un liquide pas comme les autres

Dans une molécule d'eau, les atomes s'assemblent en mettant en commun leurs électrons, particules de charge électrique négative. Mais ce partage ne se fait pas de manière équitable. L'atome d'oxygène tend en effet à attirer les électrons, tandis que l'hydrogène cherche plutôt à s'en débarrasser. H_2O possède ▶

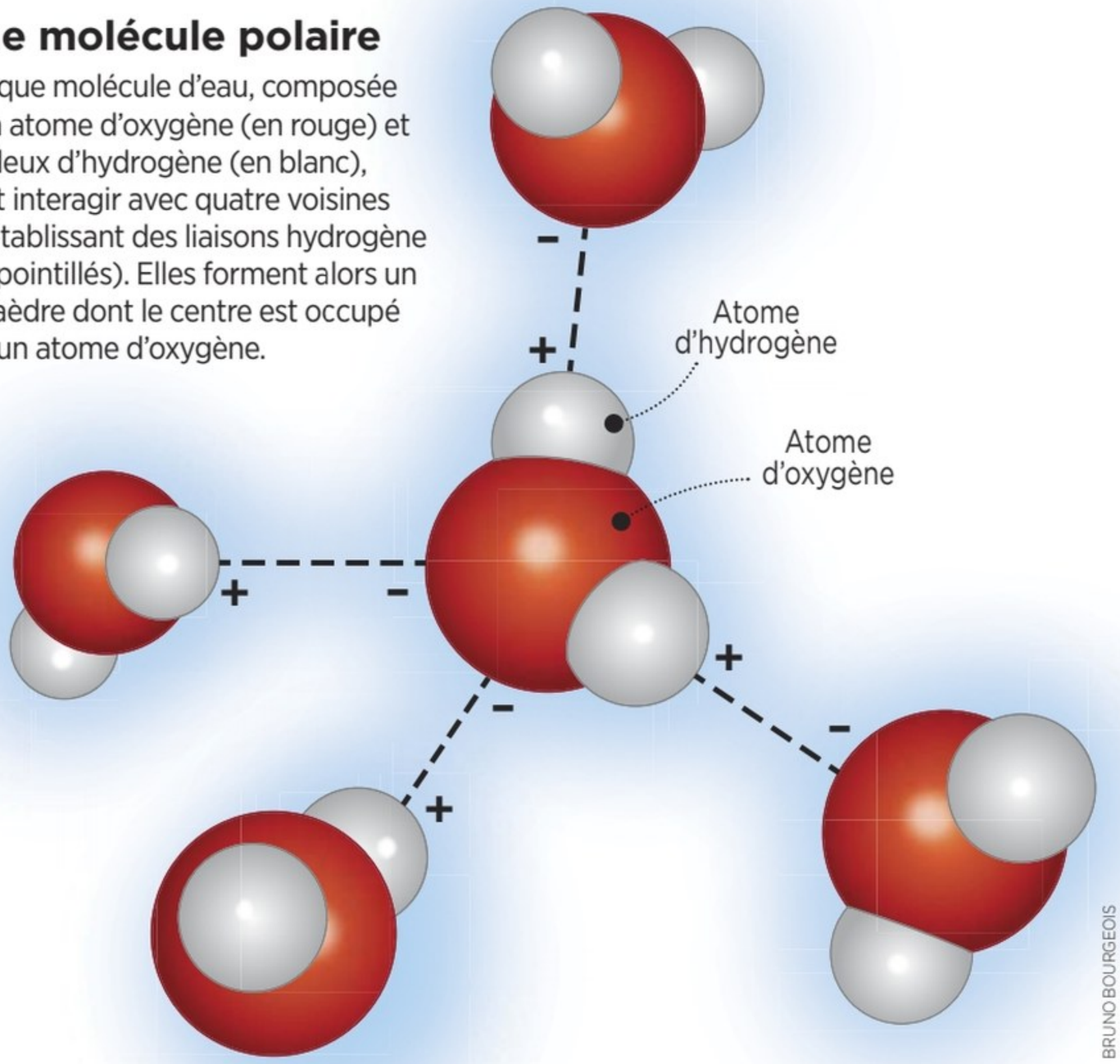
ainsi un excès de charges négatives du côté de l'oxygène et un excès de charges positives du côté des deux atomes d'hydrogène. Une polarité à l'importance capitale, car les molécules vont pouvoir interagir grâce à elle, le pôle négatif de l'une attirant les pôles positifs d'une autre, par un type d'interaction que les chimistes appellent des « liaisons hydrogène ». « *L'eau liquide ne peut donc pas être considérée comme un simple empilement de molécules qui rouleraient les unes sur les autres* », explique Damien Laage, professeur attaché de chimie théorique à l'École normale supérieure de Paris. Contrairement au méthane (CH_4) par exemple, qui ne développe pas de telles interactions. D'autres molécules peuvent certes former des liaisons hydrogène (l'ammoniaque, l'éthanol du vin ou l'acide formique secrété par les insectes), mais elles n'en produiront jamais autant que l'eau, car ces molécules sont plus grosses, ce qui génère des encombrements. « *L'eau est un cas idéal,* pour Frédéric Caupin. *Chaque molécule pourra nouer quatre liaisons hydrogène avec ses voisines en se positionnant au centre d'un tétraèdre. Et développer ainsi un réseau tridimensionnel complet en connectant quasiment n'importe quel point du liquide.* » Ces interactions sont cependant fugaces, note Damien Laage : « *Elles se rompent et se reforment mille milliards de fois par seconde* », conférant à l'eau sa grande fluidité et l'empêchant de se comporter comme un gel.

2 L'eau devrait bouillir à - 80 °C

Ce maillage explique la plupart de ses propriétés exceptionnelles. À commencer par sa température d'ébullition, bien plus élevée que pour les corps de masse similaire. Si elle ne développait pas toutes ces interactions, les calculs indiquent qu'elle se vaporiserait non pas à 100 °C… mais à -80 °C ! À l'instar du sulfure d'hydrogène (H_2S), qui bout à -60,7 °C, ou de l'ammoniaque (NH_3), à -33 °C. « *Dans les conditions qu'on trouve à la surface de notre planète (pression de 1 bar), l'eau serait ainsi, ni solide ni liquide, mais entièrement sous forme de vapeur. Ce qui rendrait la Terre beaucoup moins favorable à la vie, du moins telle que nous la connaissons* », relève Bruno Issenmann, lui aussi chercheur à l'université Claude-Bernard Lyon 1. Pour que les molécules d'eau s'extirpent du liquide et passent dans l'atmosphère gazeuse environnante, elles doivent briser les « chaînes » qui les lient. L'agitation thermique devra donc être anormalement augmentée afin que les liaisons hydrogène vibrent et se tordent de plus en plus jusqu'à se scinder. Élever de 1 °C la température d'une certaine masse d'eau nécessite ainsi quatre fois plus d'énergie que pour une même masse d'air et dix fois plus que pour une masse identique de cuivre. « *Cette capacité à emmagasiner l'énergie thermique joue un rôle essentiel dans la régulation du climat* », souligne Damien Laage. Grâce à elle, les océans absorbent et relarguent la chaleur sans engendrer de trop fortes variations de température. « *Cet effet opère aussi à l'intérieur des cellules. L'eau qu'elles contiennent facilite le maintien d'une gamme de températures compatible avec les fonctions biologiques.* »

Une molécule polaire

Chaque molécule d'eau, composée d'un atome d'oxygène (en rouge) et de deux d'hydrogène (en blanc), peut interagir avec quatre voisines en établissant des liaisons hydrogène (en pointillés). Elles forment alors un tétraèdre dont le centre est occupé par un atome d'oxygène.



BRUNO BOURGEOIS

3 Les glaçons ne sont pas censés flotter

L'agitation thermique permet aux liaisons hydrogène de se tordre, de se rompre et de se reformer en permanence, donnant aux molécules d'eau une grande liberté de mouvement. Mais lorsque la température diminue jusqu'au point de congélation (0 °C), les ponts intermoléculaires se figent. Les structures tétraédriques constituent alors un ordre à grande distance, empêchant les molécules de bouger et transformant l'eau liquide en solide cristallin. Sous cette température, les liaisons hydrogène

JÉRÔME BORDA / NATURIMAGES

En hiver, l'eau des lacs ne gèle pas entièrement et se trouve de moins en moins froide sous la surface glacée, la température du fond se maintenant toujours à 4 °C. Cette propriété garantit la survie des poissons.

sont moins déformées, ce qui éloigne les molécules et génère davantage d'espaces vides. Résultat : une augmentation du volume d'environ 11 % et une baisse de la densité. C'est pour cette raison qu'une bouteille pleine laissée au congélateur éclatera… et que les icebergs flottent sur l'océan ! « *Un tel comportement est très inhabituel,* indique Bruno Issenmann. *Pour la quasi-totalité des matériaux, la solidification rapproche les molécules et accroît leur densité, comme dans une bouteille d'huile où la partie gelée coule.* »

4 L'eau empêche les lacs de geler en hiver

Lorsqu'un morceau de glace chauffe et commence à fondre, l'agitation thermique détruit l'architecture cristalline et désorganise les molécules. Mais curieusement, la densité du liquide n'évolue pas de façon linéaire : elle augmente jusqu'à environ 4 °C avant de diminuer. Comment l'expliquer ? « *Par le fait que l'eau, dans cette gamme de température, se comporte comme un liquide à trous* », s'émerveille Frédéric Caupin. Car le réseau de tétraèdres est encore suffisamment important pour produire de nombreux espaces vides. Les molécules libres de leur mouvement peuvent alors s'y engouffrer, d'où la hausse de densité ! « *Cette température de 4 °C n'a donc rien de magique,* indique Frédéric Caupin. *Elle résulte d'une compétition entre l'agitation des molécules et leur propension à former des réseaux de tétraèdres.* » Au-delà de 4 °C, c'est le désordre qui l'emporte : la densité diminue alors continûment tout comme le nombre de tétraèdres. Ce phénomène joue un rôle fondamental dans la stratification des lacs. En été, leur température sera plus élevée en surface et de plus en plus basse au-dessous, jusqu'à atteindre 4 °C dans les profondeurs où l'eau la plus compacte « coule ». Mais c'est l'inverse qui se produit en hiver. L'eau sera de moins en moins froide sous la surface glacée, la température du fond restant de fait à 4 °C. « *Cette stratification, qui permet aux lacs de ne pas geler entièrement, garantit la survie des poissons* », précise Bruno Issenmann.

5 Sur Uranus et Neptune, elle devient noire

À pression atmosphérique normale et au-dessous de 0 °C, les molécules d'eau cristallisent en formant des tétraèdres qui s'emboîtent eux-mêmes selon une géométrie hexagonale. Tel est le type ▸

NORDINSE/SHUTTERSTOCK

L'eau possède une sorte de peau à l'interface entre l'air et le liquide, appelée « tension superficielle ». Cette propriété explique la formation des gouttes de rosée.

d'eau solide, la glace, qu'on trouve sur notre planète. Mais les molécules peuvent interagir et s'agencer de bien d'autres manières. Quand la pression est 2000 fois plus forte que celle de l'atmosphère (2000 bars), elles constituent par exemple un cristal orthorhombique appelé « glace II ».

En jouant sur les conditions de pression et de température, les chercheurs ont synthétisé ainsi de nombreuses structures cristallines. La dernière date de 2019. Observée sous une pression inouïe de 2 millions de bars et une température de 5 000 °C, elle est très différente de celle qui emplit nos congélateurs. De couleur noire, quatre fois plus dense, elle s'organise selon une géométrie cubique… et conduit l'électricité presque aussi bien qu'un métal ! Baptisé « glace XVIII » ou « glace superionique », ce matériau n'est pas qu'une curiosité de laboratoire. *« Il serait présent à l'intérieur des planètes géantes comme Neptune ou Uranus et leurs analogues extrasolaires, où les températures et pressions très élevées permettraient la formation de cette glace très conductrice »*, indique Bruno Issenmann.

6 C'est un extraordinaire dissolvant

Déposez une cuillerée de sel dans un verre d'eau, puis remuez. L'eau redeviendra vite très claire, les cristaux devenant invisibles car totalement dissous. Plus encore que l'acétone ou le méthanol, l'eau fait partie des liquides qui dissolvent le mieux les composés ioniques. À l'instar du sel de cuisine (chlorure de sodium), ils sont constitués d'ions portant une charge négative (ici l'ion chlorure Cl^-) et d'ions chargés positivement (Na^+). Or les molécules d'eau interagissent fortement avec ces ions, ce qui permet de les dissocier, chaque ion s'entourant d'une coque de molécules et se déplaçant librement dans le fluide. Par un mécanisme similaire, impliquant cette fois les liaisons hydrogène, l'eau dissout également la totalité des espèces polaires : de la famille des sucres, des alcools, des amines, des acides et autres composés alcalins. Ces cohortes de molécules pourront se disperser, se rencontrer et éventuellement réagir entre elles. Elles seront en outre facilement convoyées, grâce à l'eau présente dans la sève (95 %), le plasma sanguin (90 %) ou les cellules de notre corps (70 %). Essentielles pour l'activité cellulaire, les protéines se solubilisent aussi parfaitement dans l'eau grâce aux groupements d'alcools ou d'amines qu'elles contiennent.

7 Marcher sur l'eau ne relève pas du miracle

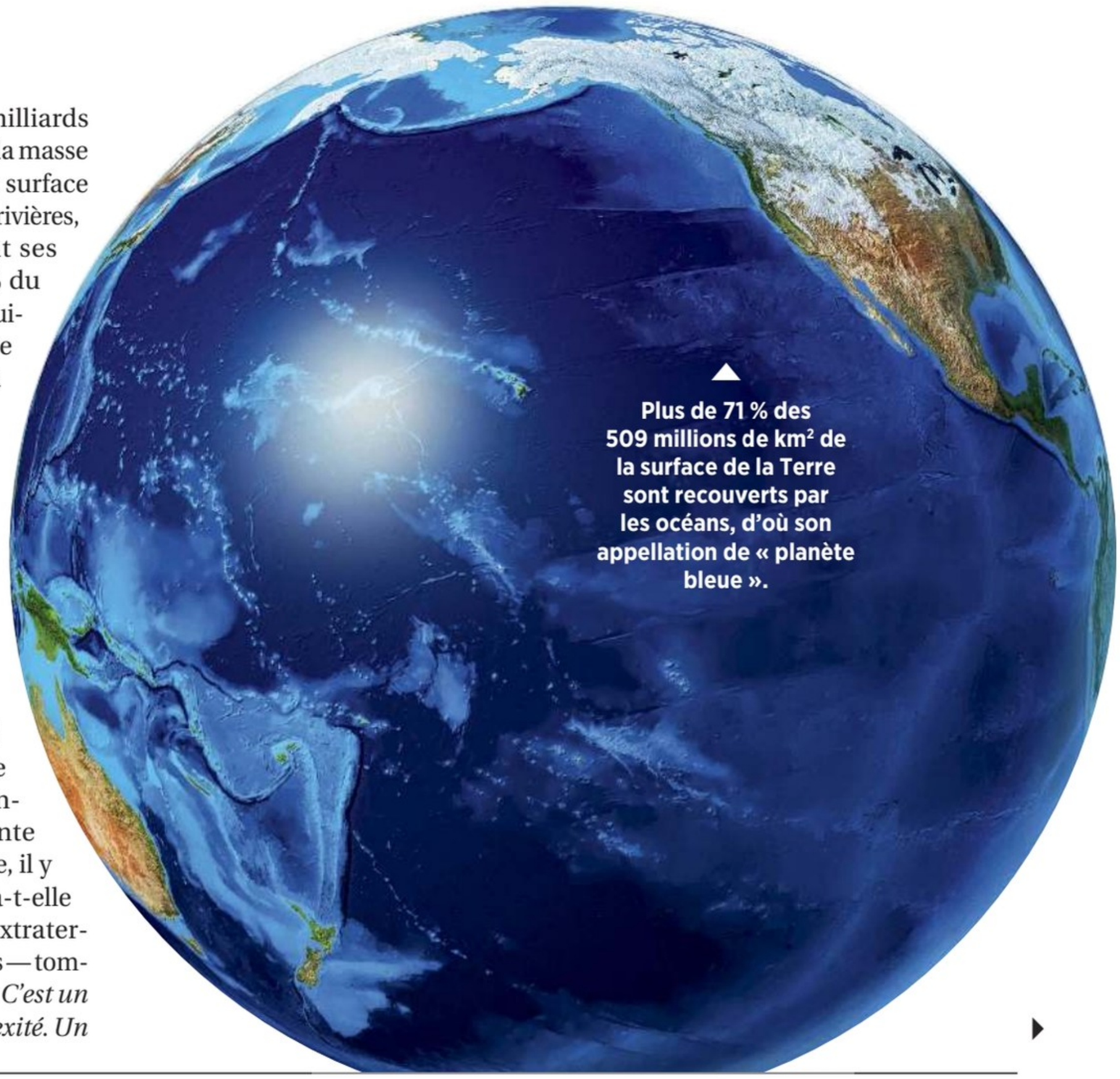
Si la rosée se condense en gouttes sphériques sur les feuilles d'un arbre et que des insectes comme le gerris — ou punaise d'eau — peuvent marcher sur un étang, c'est parce que l'eau possède une sorte de « peau ». À l'interface entre l'air et le liquide, les molécules d'eau auront en effet moitié moins de voisines avec lesquelles interagir. Elles seront plus fortement attirées vers l'intérieur du fluide et sur le plan horizontal, créant une force de tension à sa surface. En raison des liaisons hydrogène, cette « tension superficielle » de l'eau atteint 72,8 millinewtons par mètre à température ambiante. *« Une valeur bien plus importante que la plupart des autres liquides. Seul le mercure fait mieux »*, précise Damien Laage. En 2017, les chercheurs de l'institut Lumière matière (université Claude-Bernard Lyon 1/CNRS) ont mesuré la force de traction jusqu'à laquelle l'eau pouvait être étirée tel un élastique. Grâce à des lasers et en étudiant des gouttes de 5 millionièmes de mètre, ils ont établi que *« cette force était 1400 fois plus importante que la pression atmosphérique »*, s'ébahit Frédéric Caupin. Au-delà, l'eau perd sa cohésion… et craque littéralement avant de reformer une bulle. ■ **Franck Daninos**

@ fdaninos

L'énigme de l'origine de l'eau s'éclaircit

Un nouveau scénario s'impose peu à peu pour expliquer la présence de cette précieuse ressource sur Terre. Son apport par des objets célestes, hypothèse qui a longtemps prévalu, est nettement revu à la baisse. Notre planète devait posséder dès le début les éléments nécessaires à la fabrication de l'eau.

Trois milliards de milliards de tonnes. Telle est la masse d'eau présente à la surface de la Terre, dans ses rivières, ses lacs et surtout ses océans, qui recouvrent 71 % du globe terrestre et donnent à celui-ci sa couleur bleue. Mais toute cette eau ne constitue que la partie émergée de l'iceberg, si l'on peut dire. Des quantités encore plus importantes seraient enfouies sous la croûte de notre planète, à des centaines de kilomètres de profondeur dans les roches du manteau. Elles renfermeraient l'équivalent de deux à dix océans mondiaux, selon les différentes estimations ! Quelle est l'origine de cette précieuse ressource, si essentielle à la vie ? Est-elle présente depuis la naissance de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années ? Ou a-t-elle été apportée par des corps extraterrestres — comètes ou astéroïdes — tombés ici-bas et riches en eau ? *« C'est un problème d'une grande complexité. Un*



NASA / LEONELLO CALVETTI / SPL / AFP

Plus de 71 % des 509 millions de km² de la surface de la Terre sont recouverts par les océans, d'où son appellation de « planète bleue ».

véritable serpent de mer qui a connu de nombreux rebondissements et agite la communauté scientifique depuis plusieurs décennies », lâche Jean-Alix Barrat, géochimiste au Laboratoire des sciences de l'univers marin à l'université de Bretagne occidentale. Un nouveau scénario commence toutefois à s'imposer depuis ces cinq dernières années, réunissant enfin les différentes pièces du puzzle. Il ne nie pas que des objets célestes ont abreuvé notre planète pendant plusieurs milliards d'années. « *Mais cette contribution a dû être minoritaire. Car la Terre, dès l'origine, recelait sans doute tous les éléments nécessaires pour créer la majorité de son eau* », avance Laurette Piani, du Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CRPG) à Vandœuvre-lès-Nancy (Meurthe-et-Moselle).

À l'instar des autres planètes telluriques du Système solaire (Mercure, Vénus, Mars), la Terre a été fabriquée dans ses régions internes, à proximité du Soleil, en accrétant des quantités de plus en plus importantes de poussières et de roches. Les températures étaient cependant trop élevées (supérieures à 150 kelvins) pour que des atomes d'hydrogène et d'oxygène s'assemblent en molécules d'eau qui se stabilisent à l'état solide. Lors du processus d'accrétion, les planètes telluriques n'ont donc pas pu incorporer de la glace d'eau dans leurs constituants rocheux. « *D'où l'idée d'une Terre originellement sèche qui a longtemps prévalu, l'eau devant être apportée ensuite par des objets issus de régions plus éloignées du Soleil, au-delà de l'orbite de Mars* », rappelle Jérôme Aléon, géochimiste au Muséum d'histoire naturelle de Paris et à l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie à Sorbonne Université.

L'hypothèse de l'apport par des objets extraterrestres

Cette vision a été confortée, à partir des années 1970, par des études pétrographiques suggérant que la quasi-totalité des roches terrestres étaient dépourvues d'eau. Mais aussi par les premières analyses des échantillons de pierres lunaires collectés entre 1969 et 1972 par les missions Apollo. Elles montraient que notre compagnon céleste résultait d'un impact géant entre notre jeune planète et un corps de la taille de Mars baptisé « Théia ». Or cette collision cataclysmique, survenue quelque 50 millions d'années après la naissance de la Terre, aurait transformé sa surface en un océan de magma. Et vaporisé ainsi une grande partie des éléments volatils — l'eau en particulier, qui serait donc arrivée après coup.

Mais par quels types d'objets ? Il faut que les candidats puissent fournir des quantités d'eau suffisamment importantes par rapport à celles qui seraient présentes sur notre planète. Et que cette eau possède la même signature chimique que celle des océans terrestres

GÉOLOGIE

De l'eau à 660 kilomètres de profondeur

Des géologues américains ont réalisé l'année dernière une fascinante découverte en examinant un diamant issu de la mine de Karowe, au Botswana. Lors de sa formation dans les entrailles de la Terre, ce diamant avait piégé une minuscule inclusion contenant un minéral extrêmement rare, dénommé « ringwoodite ». Composé de magnésium, de fer, d'oxygène et de silicium, il ne se forme qu'à très haute pression, dans la zone de transition entre le manteau supérieur et inférieur de notre planète, soit à des profondeurs comprises entre 410 et 660 kilomètres. Il y serait toutefois majoritaire… et piège dans sa structure cristalline 1,5 % d'eau. C'est seulement la deuxième fois qu'un cristal de ringwoodite est mis en évidence à l'état naturel. En 2014, d'autres chercheurs américains avaient déniché alors le tout premier spécimen, là aussi à l'intérieur d'un diamant extrait de la mine de Juína, au Brésil. Mais la découverte de 2022 est encore plus intéressante pour les scientifiques. Car dans le diamant africain, la ringwoodite est associée à d'autres minéraux — l'enstatite et la ferropériclase — qui, eux, ne se forment qu'à des températures d'au moins 1650 °C et des pressions dépassant 23,5 millions de pascals. Ce qui correspond à une profondeur de 660 kilomètres, la plus importante où la présence d'eau a été pour le moment certifiée. Reste à savoir si de l'eau encore plus profonde pourrait subsister — notamment dans la bridgmanite, minéral majoritaire du manteau inférieur qui s'étend jusqu'à 2900 kilomètres sous nos pieds.

KAREN V. SMIT, GIA

L'inclusion de ringwoodite de 30 micromètres a été retrouvée dans un diamant extrait d'une mine brésilienne.

et du manteau. « *Selon les conditions pendant lesquelles les molécules d'eau se forment, elles recèlent différentes quantités de deutérium — un isotope stable de l'hydrogène qui contient un neutron supplémentaire dans son noyau atomique,* explique Jérôme Aléon. *Cette proportion est certes minuscule mais toujours la même, ce qui permet de discriminer les sources potentielles et remonter la piste de l'eau terrestre.* » Dans l'eau de notre corps (nous en sommes composés à près de 65 %), celle qui coule des robinets ou qui compose l'ensemble des océans, le rapport entre les atomes de deutérium et d'hydrogène (noté D/H) correspond ainsi à 156 pour 1 million. Il est en revanche moins important — environ 130 pour 1 million — dans les laves et les minéraux du manteau, comme différentes mesures ont pu le montrer à partir des années 1990. L'hydrogène n'y est certes pas associé à l'oxygène, ingrédient principal (à plus de 50 %) de ces minéraux. Mais il réagit avec celui-ci et produit des molécules d'eau liquide dès que les conditions de pression et de température le permettent, lorsque les roches remontent des profondeurs.

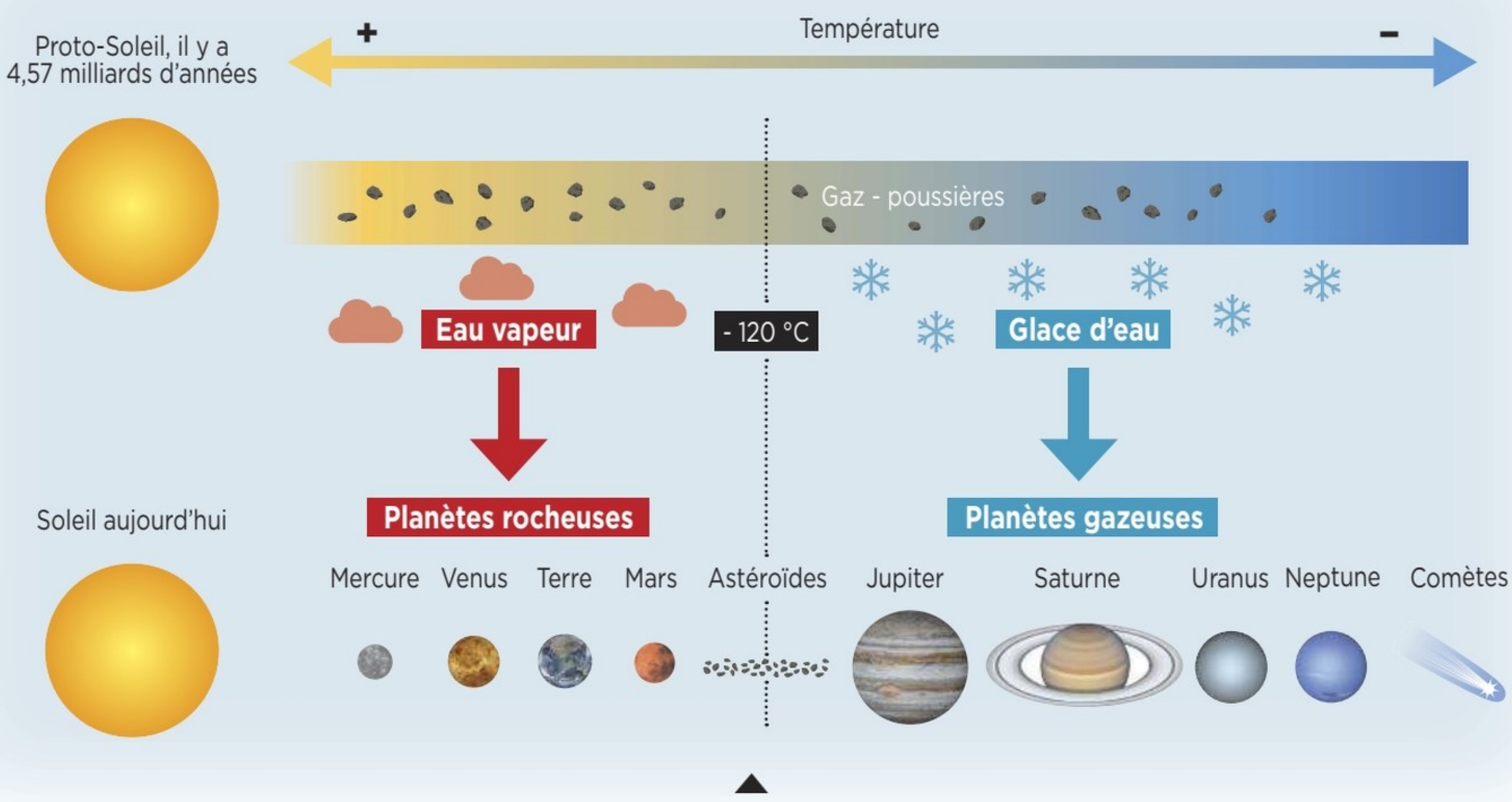
ESA/ROSETTA/NAVCAM

La glace contenue dans les roches de « Tchouri » a été vaporisée lorsque la comète s'est rapprochée du Soleil, formant une sorte de halo.

Les comètes ont fait figure de « suspect idéal »

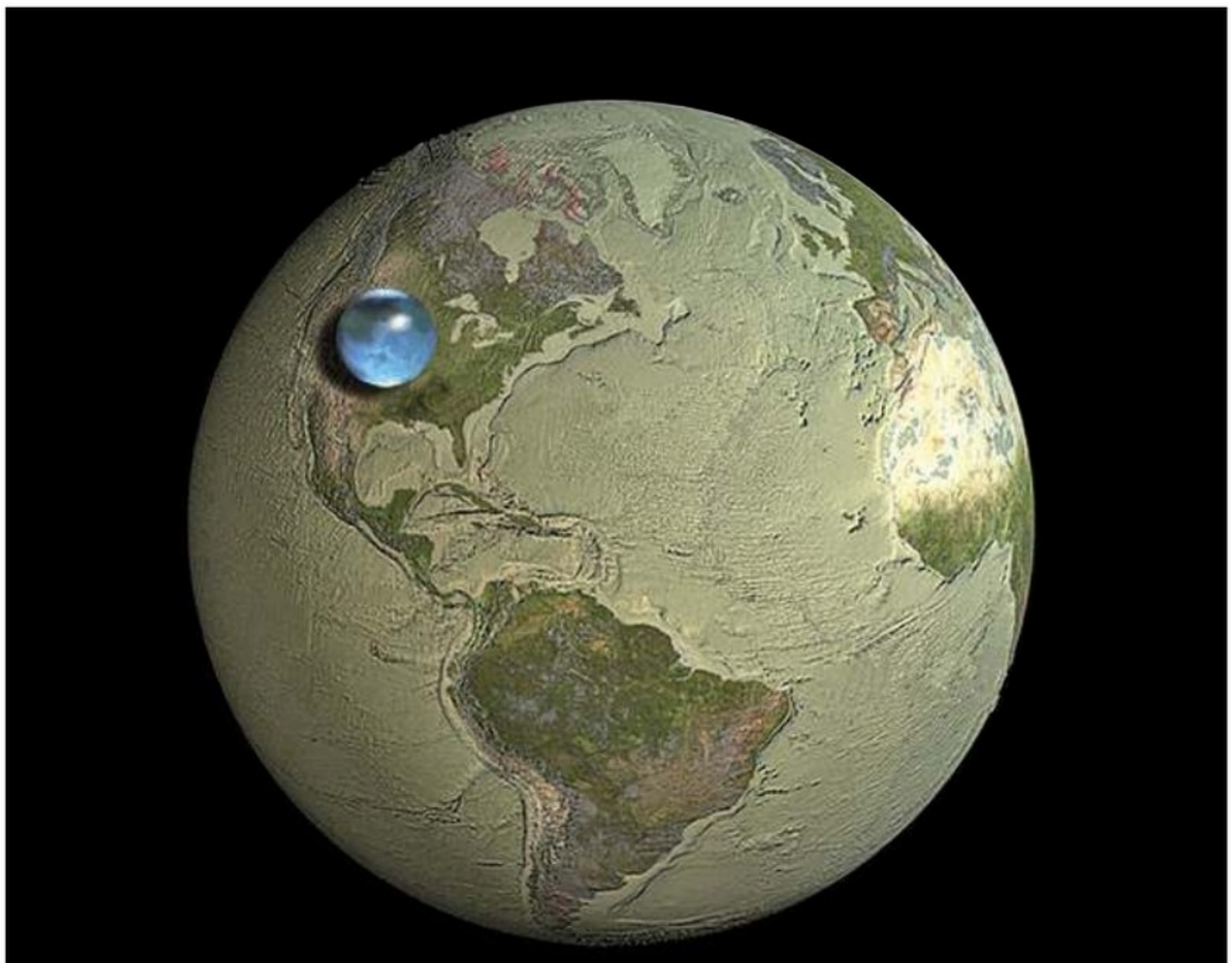
Pour alimenter les différentes citernes terrestres, en surface comme dans les entrailles de notre planète, « *les comètes ont d'abord fait figure de suspect idéal* », souligne Jérôme Aléon. Issues de régions froides et lointaines au-delà de l'orbite de Neptune, elles contiennent de 40 à 50 % d'eau sous forme de glace qui aurait très bien pu arroser la Terre après sa formation. Problème : les signatures isotopiques ne correspondent pas ! Depuis les années 1980, les observations effectuées par des télescopes ▶

Comment la température a façonné les planètes



BRUNO BOURGEOIS

Les planètes et différents corps se sont formés par agglomération des poussières contenues dans le Système solaire primitif. L'incorporation de l'eau dans les corps planétaires dépend de la température environnante : au-dessus de -120 °C, et aux faibles pressions du milieu interplanétaire, l'eau est sous forme de vapeur et ne s'agglomère pas aux autres solides.



USGS

Les eaux de surface de la Terre ne représentent que 0,02 % de la masse de celle-ci. Elles pourraient être contenues dans une sphère de 1300 km de diamètre, comme sur cette vue d'artiste.

HYDROLOGIE

Une planète globalement très sèche

L'eau douce contenue dans les calottes glaciaires, les glaciers, les lacs, les rivières, les nappes phréatiques, l'humidité du sol, les nuages ou encore l'ensemble des organismes vivants ne constitue que 3 % de l'eau présente dans les enveloppes externes de la Terre. L'écrasante majorité (97 %) emplit de fait les étendues d'eau salée : les mers et surtout les océans, dont la profondeur moyenne atteint 3,8 kilomètres. Toute cette eau ne correspond néanmoins qu'à 0,02 % de la masse de notre planète, qui est donc globalement très sèche ! *« Elle serait entièrement contenue dans une sphère de 1300 kilomètres de diamètre »*, observe la cosmochimiste Laurette Piani, soit la taille de l'Italie entre le nord et le sud. Et même si l'on ajoute l'eau stockée dans les profondeurs du manteau, ce qui doublerait voire décuplerait le bilan global, on obtiendrait au maximum 0,2 % de la masse totale de la planète dite bleue.

sur une dizaine de comètes ont montré, en effet, que le rapport D/H était deux fois plus important que dans les océans. Et en 2015, lorsque la sonde européenne Rosetta s'est satellisée autour de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko (dite Tchouri), elle a constaté que ce ratio était plus élevé encore — de 530 pour 1 million. *« En croisant une série de données, mes collègues du CRPG ont calculé que les comètes n'auraient apporté que 1 % de l'eau océanique »*, signale ainsi Laurette Piani.

L'attention s'est focalisée alors sur les astéroïdes. Ces morceaux de roches qui n'ont pas pu s'agglutiner pour créer des planètes sont effectivement très nombreux, gravitent dans des régions moins lointaines que les comètes (entre Mars et Jupiter) et pleuvent continûment sur notre planète en produisant des météorites. Or une catégorie d'entre elles, les chondrites carbonées, contient *« jusqu'à 15 % d'eau piégée entre des feuillets d'argile, et provient de corps qui seraient majoritaires dans la ceinture d'astéroïdes »*, souligne Jérôme Aléon. Les analyses isotopiques sont toutefois difficiles à exploiter, ne fournissant pas de réponse claire et univoque.

Le transport d'eau par les chondrites carbonées

Car dans la famille des chondrites carbonées, qui comprend une dizaine de sous-groupes, le rapport D/H couvre une gamme relativement large : parfois au-dessous ou au-dessus de celui des océans. Il a pu être mesuré, en avril, dans les échantillons de l'astéroïde Ryugu collectés par la sonde japonaise Hayabusa 2 quatre ans auparavant. Dans cet astéroïde apparenté aux chondrites carbonées du groupe « CI », la proportion de deutérium équivaut ainsi à 165 pour 1 million. *« Selon nos estimations, cette classe d'astéroïdes aurait pu fournir jusqu'à 30 % de l'eau océanique »*, pose Laurette Piani, auteure principale de ces travaux.

D'autres arguments avaient ébranlé, dès 2018, la théorie d'un apport extraterrestre prédominant. Pour le quantifier, une équipe de géochimistes britanniques, français et américains avaient comparé alors les compositions isotopiques de l'oxygène contenu dans des roches lunaires et terrestres. Elles émanaient, pour notre satellite naturel, des six alunissages des vaisseaux Apollo. Et pour la Terre, de laves émises au niveau des dorsales océaniques, récupérées par dragage ou grâce au *Nautile,* le sous-marin de poche de l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer). *« En provenance directe du manteau, ces laves*

JULIE NOURY SOYER

« On avait toujours supposé que les chondrites à enstatite étaient totalement sèches. On les avait donc écartées de toutes les enquêtes sur l'origine de l'eau »

Laurette Piani, cosmochimiste au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques

n'ont pas été altérées par des interactions avec l'atmosphère ou des fluides, explique Jean-Alix Barrat qui a participé à cette étude. *Elles reflètent donc fidèlement la composition chimique et isotopique de notre planète.* »
Les mesures ont montré que les roches lunaires et terrestres étaient extrêmement similaires mais tout de même différentes, de trois à quatre parties par million. « *Or, cette infime disparité permet d'estimer les quantités d'eau et d'éléments volatils fournies après l'impact entre la proto-Terre et Théia, puisque les deux corps ont fusionné et homogénéisé leurs constituants* », précise Jean-Alix Barrat.

Des conclusions surprenantes, contre-intuitives

Selon les calculs des chercheurs, les comètes et astéroïdes n'auraient ainsi apporté que 5 à 30 % de la totalité des eaux terrestres — fourchette relativement large prenant en compte les incertitudes sur l'eau du manteau *(lire l'encadré p. 36)*. Dans tous les cas, cela signifie que la collision avec Théia n'a pas asséché notre jeune planète… et que celle-ci renfermait déjà d'immenses quantités d'eau. Un changement radical de vision ! « *Ces conclusions sont surprenantes, contre-intuitives. Mais il faut regarder les données en face,* insiste le scientifique breton. *Elles soulèvent certes de nombreuses interrogations, à commencer par la manière dont les roches terrestres originelles ont pu séquestrer et conserver autant d'eau.* »
En 2020, Laurette Piani et ses collaborateurs du CRPG ont peut-être trouvé la clé du mystère. Ils ont examiné un certain type de météorites, nommées « chondrites à enstatite », dont la composition chimique est quasiment identique aux roches de la Terre. Les scientifiques estiment que ces roches se sont formées dans la même région que notre planète il y a 4,6 milliards d'années, servant ainsi de matériau de base lors du processus d'accrétion. Elles contiennent, notamment, des quantités importantes de sulfures de calcium et de magnésium qui supportent très mal la présence d'eau. « *On avait ainsi toujours supposé, jusqu'ici, que les chondrites à enstatite étaient totalement sèches,* relève Laurette Piani. *Elles étaient donc écartées de toutes les enquêtes sur l'origine de l'eau.* »
Les analyses étaient cependant lacunaires. En raison de la rareté des chondrites à enstatite, tout d'abord. Parmi les 70 000 météorites répertoriées à ce jour, moins de 200 appartiennent en effet à cette catégorie. La plupart présentent en outre de nombreux signes d'altération terrestre, ce qui faussait les résultats des mesures. Or, en auscultant 13 spécimens très bien conservés par deux techniques complémentaires (examen de la roche après broyage d'un fragment représentatif et analyse de minuscules phases minéralogiques par des sondes ioniques), les chercheurs nancéiens ont découvert que les chondrites à enstatite contiennent en réalité jusqu'à 0,5 % d'eau… et que le rapport D/H est identique à celui du manteau !

Des expériences en cours avec des résultats attendus l'an prochain

Ce pourcentage peut paraître dérisoire. Mais en partant du principe que les chondrites à enstatite constituent le matériau de base de la Terre, ces roches pourraient renfermer de 3 à 23 fois l'équivalent des océans ! Elles expliqueraient à tout le moins l'origine de l'eau mantellique, puisque le rapport D/H est exactement le même. Et jusqu'à 70 % des eaux superficielles, le reste ayant été apporté par des comètes et des astéroïdes. « *Une partie de l'eau des profondeurs serait remontée en surface par le volcanisme, des phénomènes de dégazage et la tectonique des plaques,* détaille Laurette Piani. *Elle se serait mélangée à l'eau d'origine extraterrestre, d'où les teneurs plus importantes en deutérium.* » Il reste encore à expliquer comment les chondrites à enstatite peuvent piéger des quantités significatives d'hydrogène. Des expériences sont en cours, pour cela, au CRPG. Objectif : déterminer les conditions particulières, à très haute température, dans lesquelles l'hydrogène s'incorpore dans les billes silicatées de ces roches. Les résultats devraient être connus d'ici à l'année prochaine. ■

Franck Daninos @fdaninos

CHRISTINE FIENI/ LAURETTE PIANI/ FRENCH NATIONAL MUSEUM OF NATURAL HISTORY.

Dans cette chondrite à enstatite provenant d'un morceau de la météorite Sahara 97096, des concentrations d'eau de l'ordre de 0,5 % en poids ont été mesurées.

L'eau dans le monde et en France

Volume total d'eau à la surface de la Terre

14 000 000 000 000 000 000 000 litres

97 % eau salée

3 % eau douce

77 % Glaciers

1 % Eau douce disponible

22 % Eau dans le sol

66 % Lacs

22 % Nappes phréatiques

6,5 % Eau atmosphérique

5,5 % rivières

BRUNO B BOURGEOIS

24 millions de milliards de litres
Consommation humaine mondiale d'eau par an **6 fois** le volume de la Manche

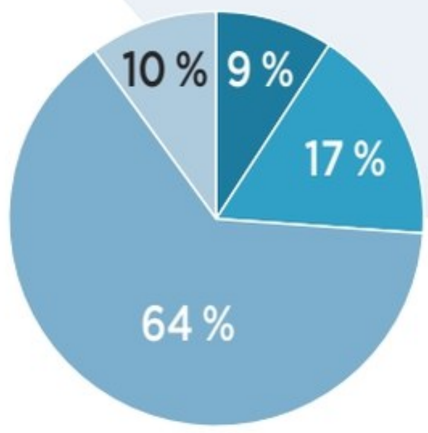
69 %
de l'eau douce disponible
sur la planète est utilisée annuellement

2 milliards
d'humains n'ont pas accès à l'eau potable

Qui utilise l'eau en France ?

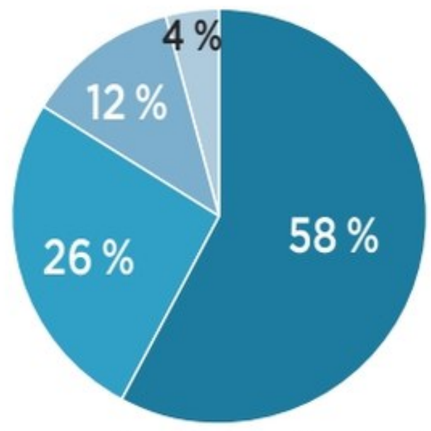
par secteur d'activité

Prélèvements



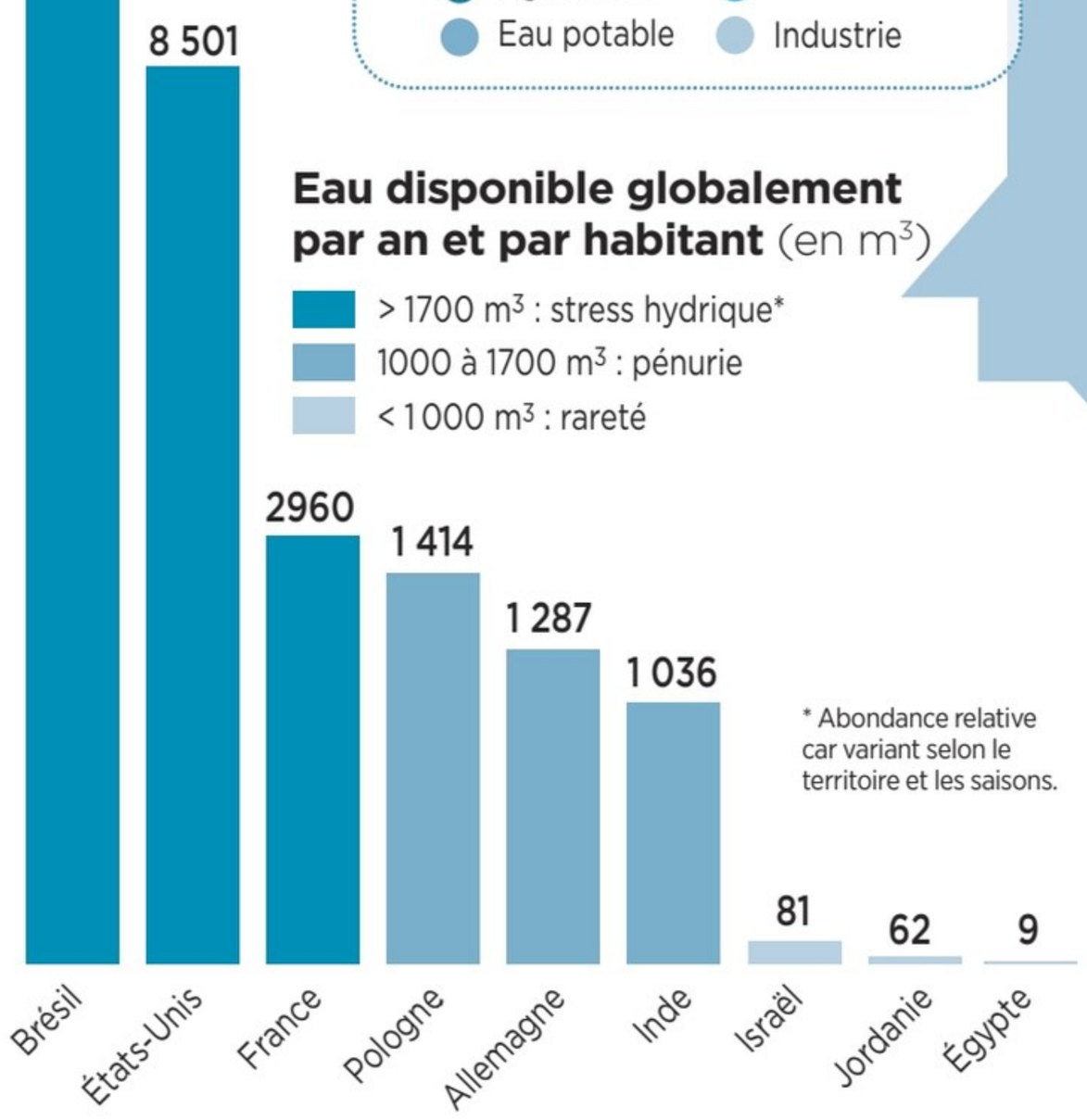
Quantité d'eau prélevée dans le milieu naturel puis rejetée après utilisation

Consommation



Quantité d'eau prélevée et réellement consommée

- Agriculture
- Nucléaire
- Eau potable
- Industrie



Eau disponible globalement par an et par habitant (en m^3)

- > 1700 m^3 : stress hydrique*
- 1000 à 1700 m^3 : pénurie
- < 1000 m^3 : rareté

* Abondance relative car variant selon le territoire et les saisons.

600 000 plans d'eau,
pour une surface totale de 4550 km², soit 0,8 % de la superficie de la France

900 000 km
de réseaux de distribution avec 20 % de fuites

253 320 cours d'eau

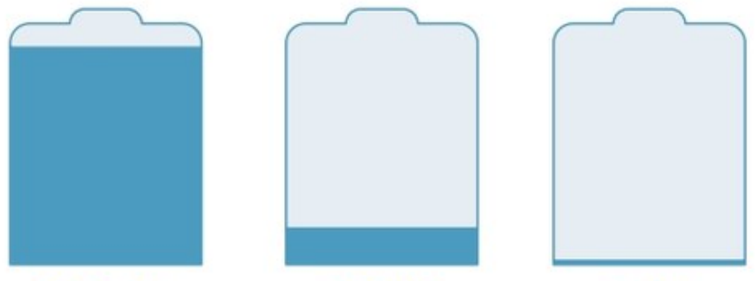
Entre 6 % et 7,3 %
de la surface agricole utilisée irriguée en 2020

147 litres
consommés par jour et par habitant

25 % des captages d'eau
ont été fermés en 40 ans pour des raisons de pollution par les pesticides et nitrates

Sources : ONU ; Veolia ; Terasmaa et al., *Heliyon*, 2019 ; OFB ; EauFrance ; CNRS ; Abbott et al, *Nature*, 2019 ; Inrae ; FNE.

Recyclage des eaux usées



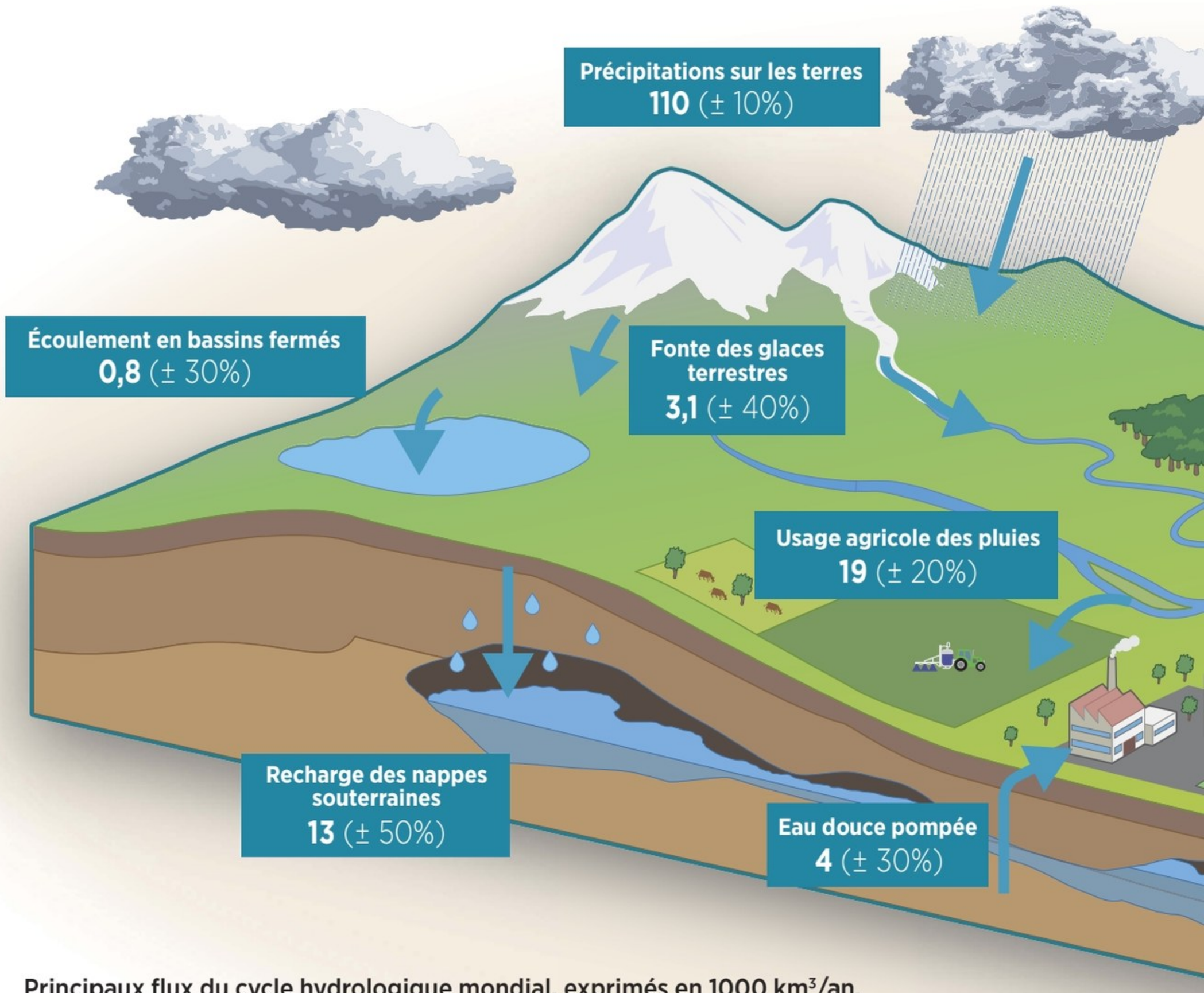
90 % Israël

15 % Espagne

1 % France

Voici le véritable cycle de l'eau

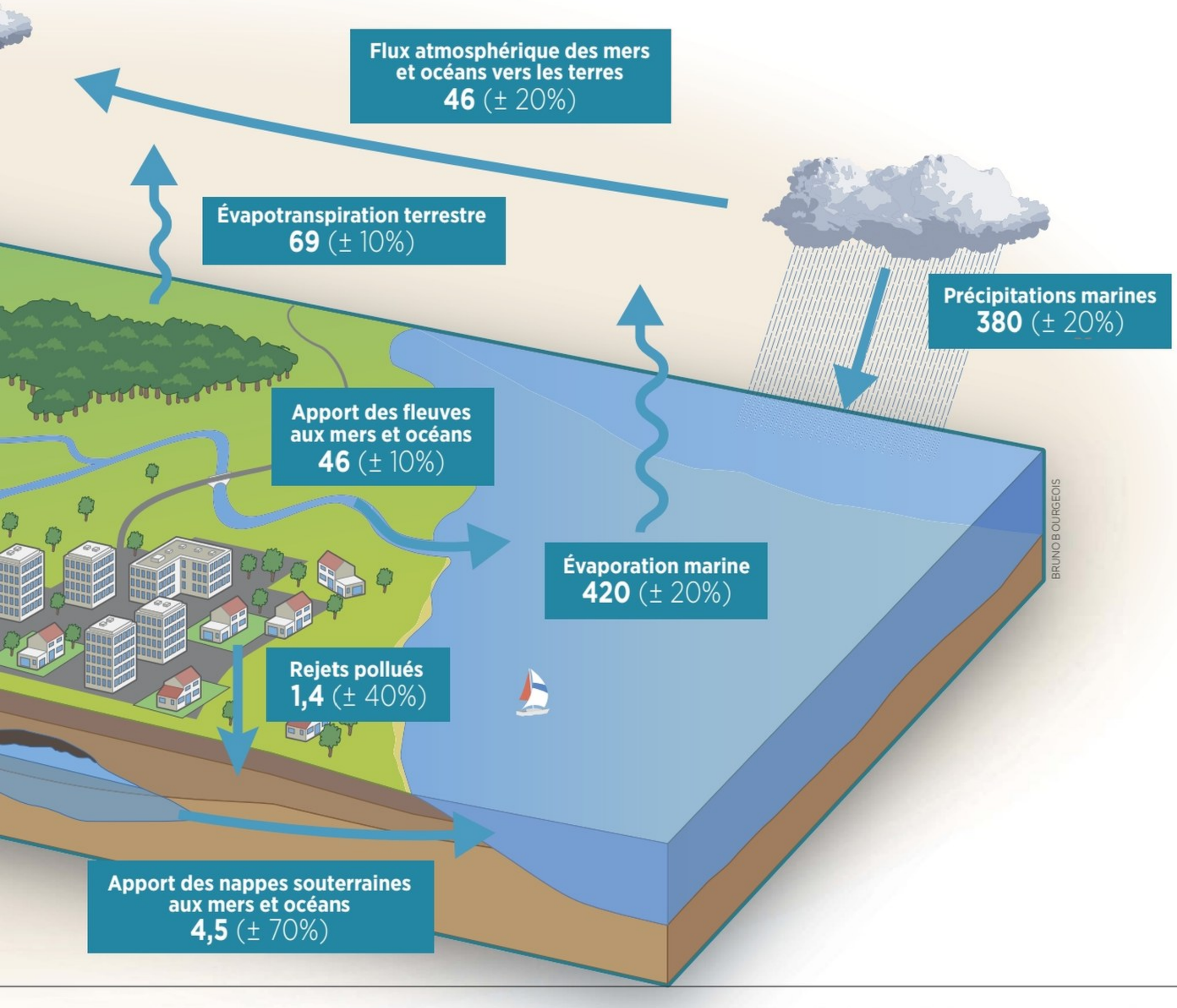
Les représentations classiques du cycle hydrologique sont obsolètes, avance une équipe internationale de chercheurs. Celles-ci en effet ne prennent pas en compte le détournement par les humains de la ressource à des fins agricoles ou industrielles.



Principaux flux du cycle hydrologique mondial, exprimés en 1000 km³/an, avec marge d'incertitude en ± %.

Les schémas rituels que l'on trouve dans les livres de géographie ou de sciences de la Terre sont faux ! C'est le message lancé par une équipe internationale chapeautée par l'université Brigham Young (États-Unis) dans un article retentissant paru dans *Nature geoscience* en 2021. Ces représentations classiques font en effet l'impasse sur la captation par l'humain de la ressource aquatique. L'agriculture, l'industrie, les villes en consomment en effet tous les ans 24 000 kilomètres cubes qui se trouvent ainsi détournés du cycle naturel. Celui-ci est par ailleurs bien plus complexe que le circuit traditionnel de l'évaporation au-dessus de l'océan, des précipitations sur les continents et du retour de l'eau douce à la mer. D'abord, les précipitations au-dessus des mers sont huit fois plus importantes que les pluies tombant sur les continents. Ensuite, le retour de l'eau douce à la mer par les rivières n'est pas rectiligne. Les végétaux en pompent une partie qui est restituée à l'atmosphère par leur évapotranspiration, créant ainsi une sorte de cycle continental de l'eau. Enfin, les humains bloquent les flux par leurs barrages, pompent la ressource pour conduire leurs activités industrielles, pour irriguer leurs récoltes et pour s'abreuver. Et ils y ajoutent leurs pollutions. Les chercheurs ne cessent d'affiner leurs estimations des volumes concernés pour mieux déterminer où exactement se trouve l'eau et en quelles quantités. Afin d'en améliorer une gestion globale qui n'est aujourd'hui ni efficace, ni durable. ■ **Loïc Chauveau**

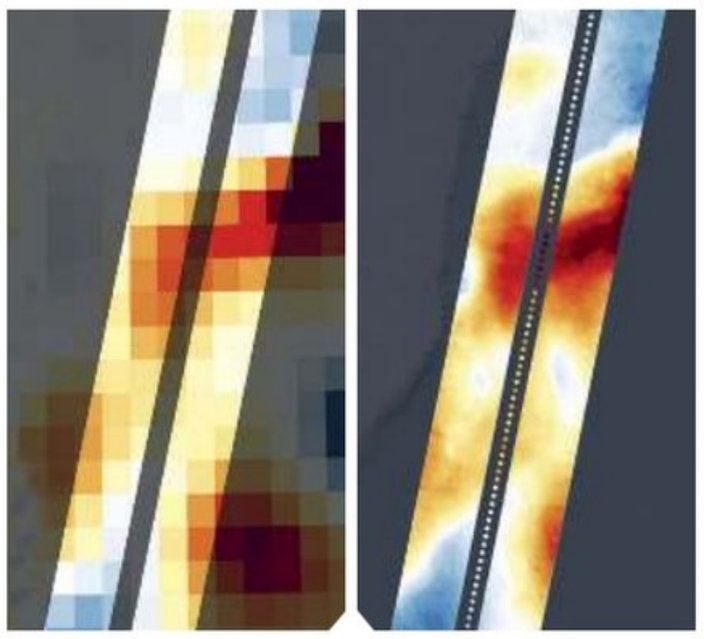
@Loic_Chauveau



Un satellite dévoile le monde des lacs, rivières et océans

Swot va permettre d'étudier les ressources en eau continentales, mais aussi la dynamique des océans. Avec une précision plus de dix fois supérieure à celle obtenue par les autres satellites altimétriques actuellement en service.

« *Avec le satellite Swot, nous allons pour la première fois recenser la quasi-totalité de l'eau douce présente à la surface de la Terre,* explique Annick Sylvestre-Baron, responsable du programme Swot au Cnes (Centre national d'études spatiales). *Et démontrer que la large fauchée* [une bande de la surface terrestre] *est un concept important pour le suivi futur des ressources en eaux douces et des océans.* » Menée par le Cnes et la Nasa, la mission Swot (Surface Water and Ocean Topography) a été lancée le 16 décembre 2022 depuis la Californie, aux États-Unis. Après une première étape de six mois de tests et de calibration des instruments, le satellite a rejoint son orbite opérationnelle à 890 km d'altitude en juillet. Le premier jeu de données pour la communauté internationle est attendu à l'automne. Des premières observations ont toutefois été rendues publiques en mars : elles nous dévoilent le Gulf Stream au large des côtes de la Caroline du Nord et de la Virginie et les lacs et rivières de la région de Toulouse. Avec « *une précision bien meilleure qu'escomptée* », souligne Annick Sylvestre-Baron, alors que celle-ci était supposée être déjà dix fois supérieure à celle obtenue par les autres satellites altimétriques actuellement en service…



COPERNICUS MARINE SERVICE - NASA

Comparaison des résolutions d'images de Swot (à droite) et de Copernicus (à gauche), ici dans l'océan Atlantique.

Swot va donc permettre d'étudier les masses d'eau continentales, mais aussi la dynamique de surface des océans. Pour cela, le satellite est équipé de deux types d'altimètre, capables de mesurer la hauteur de la surface d'eau : un altimètre classique effectuant des mesures au nadir, soit une trace étroite de 5 à 10 km à l'aplomb du satellite ; et un interféromètre radar innovant (KaRin), constitué d'un bras de dix mètres aux extrémités duquel sont installées deux antennes altimétriques permettant de collecter les données sur une fauchée de 50 km de chaque côté de la trace du satellite, une première ! « *Il va enregistrer à lui seul autant de données que six satellites altimétriques classiques que l'on ferait voler en formation* », s'enthousiasme Aurélien Ponte, chercheur à l'Ifremer de Plouzané (Finistère).

« *Concernant les rivières, Swot va permettre de mesurer conjointement leur largeur, leur hauteur et leur pente,* note Sylvain Biancamaria, hydrologue au Legos (Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales), à Toulouse. *Autant de données qui vont permettre l'étude de leur dynamique, notamment les variations des volumes et des débits, ce qui permettra de savoir quelle quantité d'eau est disponible dans chaque bassin au cours du temps. C'est une information sociale importante, car certains réservoirs mal connus génèrent des conflits entre le pays en aval du réservoir et celui sur lequel il est situé. À l'échelle globale, ce sont des données qui n'étaient pas accessibles jusque-là.* » Ce nouvel instrument va aussi permettre de mieux comprendre l'évolution des longues inondations sur des grands bassins tels l'amazonien et

© CNES

Après six mois de tests, le satellite franco-américain devait rejoindre son orbite opérationnelle en juillet (vue d'artiste).

celui du Congo. L'eau s'évapore-t-elle ? Quelle est la part restituée au fleuve ? Cela crée-t-il des zones humides ? Par ailleurs, une partie importante des lacs et des réservoirs d'eau est située aux hautes latitudes, notamment au Canada et en Sibérie. Leur nombre réel est aujourd'hui inconnu, d'autant que certains sont saisonniers et que d'autres vont apparaître avec la fonte du pergélisol. L'agence spatiale canadienne, impliquée dans cette mission, est particulièrement intéressée par le recensement des milliers de lacs de son territoire. Afin de mieux interpréter les futures données de Swot, diverses campagnes ont été menées durant la période de calibration des instruments, en mer par plusieurs navires océanographiques et à terre pour étudier *in situ* les lacs, les rivières, mais aussi les milieux côtiers.

3 ans
la durée prévue de la mission, avec possibilité de la prolonger.

21 jours
le temps de revisite d'un même site.

8 à 15 térabits
(soit mille milliards de bits) la quantité de données transmises par jour.

« Les eaux littorales, qui s'étendent de la côte jusqu'à la fin du plateau continental, soit de 0 à 200 mètres de profondeur, correspondent à un schéma de structures de circulation plus petites et plus rapides que dans l'océan profond », souligne Guillaume Charria, chercheur au laboratoire Océan côtier de l'Ifremer, à Plouzané. Des structures difficiles à détecter par les précédents satellites. En mesurant les variations du niveau de la mer avec une précision de quelques dizaines de kilomètres — au lieu de centaines de kilomètres —, *« Swot va nous donner l'opportunité de visualiser les différentes textures de la mer,* explique Aurélien Ponte. *Le niveau de la mer varie en effet sous l'action des mouvements tourbillonnaires, des ondes, des marées, etc. »*, autant de processus qui permettent d'expliquer l'équilibre de l'océan, le mélange des eaux de surfaces et des profondeurs et les échanges de nutriments. Et d'identifier les courants.

L'océan, une « soupe » de tourbillons

« On peut imaginer la mer comme un paysage de petites collines et de vallons, dont la hauteur et la profondeur sont proportionnelles à la vitesse du courant : plus la pente est forte, plus le courant est fort, et vice versa, décrit Pierre Garreau, chercheur à l'Ifremer de Plouzané. *L'océan est une soupe de tourbillons de toutes tailles, de quelques dizaines de centimètres à quelques centaines de kilomètres, qui génèrent une partie des courants.* » Une meilleure connaissance de ces phénomènes permettra de mieux comprendre comment ils contribuent à l'équilibre climatique de l'océan en transportant les masses d'eau et en participant aux échanges de chaleur et de carbone. *In fine,* ces connaissances s'avéreront essentielles avec l'intensification du changement climatique. ■ **Sylvie Rouat** @srouat1

DAMIEN MEYER/ AFP - THIERRY OLIVIER/ HANS LUCAS - XAVIER LEOTY / AFP

Les projets de réserves de substitution, ou mégabassines, alimentées en eau par le pompage dans la nappe phréatique, font l'objet de fortes contestations, notamment celles de l'association Les Soulèvements de la Terre. Ici en novembre 2021 sur le site de Mauzé-sur-le-Mignon (Deux-Sèvres), qui devrait comporter au total 16 réservoirs de 6 millions de m³ pour l'irrigation agricole.

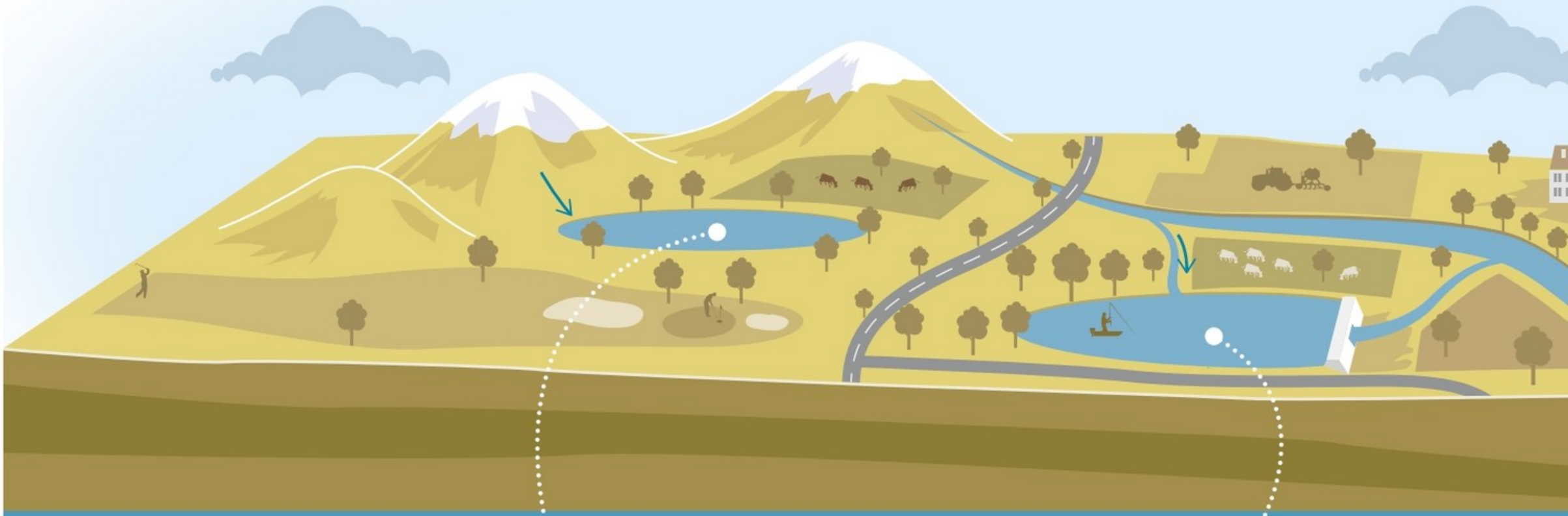
La guerre de l'eau a commencé

Depuis près de vingt ans, les conflits se multiplient et, surtout, se radicalisent autour de la gestion de l'eau en France. La question est politique et les scientifiques sont pris à partie, alors que le territoire doit s'adapter à un futur asséché par le changement climatique.

Jusqu'à 200 blessés, dont plusieurs dizaines grièvement, des balles de défense et 5000 grenades lacrymogènes, certaines également assourdissantes tirées par les gendarmes, des boules de pétanque, couteaux ou haches saisis parmi des éléments radicalisés. « *La violence inédite* » (selon les termes de la préfète) et le lourd bilan des affrontements entre des milliers de manifestants mobilisés par l'association Les Soulèvements de la Terre et 3200 membres de forces de l'ordre, autour du 25 mars à Sainte-Soline, choquent au-delà de nos frontières. Les lecteurs du chic *New Yorker* aux États-Unis, tout comme les téléspectateurs de BFMTV, savent désormais situer dans les Deux-Sèvres, en région Nouvelle-Aquitaine, cette excavation cernée de digues et de grillages consolidés, et qui pourrait contenir à terme 628 000 m^3 d'eau, l'équivalent de 250 piscines olympiques. Sainte-Soline est devenue l'objet d'un combat symbolique, « *vital, car des études annoncent encore une raréfaction de l'eau douce dans l'Hexagone et nous invitent à en repenser l'usage et le partage* », énonce Julie Trottier, directrice de recherche au CNRS, spécialiste des trajectoires de l'eau dans la construction des territoires. Le rapport de force est devenu le mode d'expression privilégié pour trancher les conflits, s'inquiète-t-elle. Comment la situation a-t-elle pu s'envenimer ainsi dans notre pays, qui n'est pas en situation de pénurie ?

Depuis quelques années, des pluies tantôt trop faibles ou trop intenses, combinées à la forte pollution des nappes phréatiques, ont entraîné des difficultés croissantes d'accès à l'eau. « *Les contestations observées au cours des derniers mois au sujet des retenues d'eau, de la qualité de la ressource, des coupures pour sécheresse sont la manifestation de ces difficultés, bien que la fréquence et la radicalité avec lesquelles elles s'expriment laissent penser que se joue là autre chose que de simples conflits d'usage* », estimait Corinne Larrue, professeure à l'université Paris-Est Créteil Val-de-Marne, spécialiste des politiques locales d'adaptation au changement climatique, lors d'un séminaire du groupe de réflexion La Fabrique de la cité. Les conflits d'usage ne sont pas une spécificité contemporaine, rappelle la chercheuse : « *L'industrialisation progressive du pays aux XIXe et XXe siècles avait fait émerger de nouveaux besoins et autant de tensions.* » La première grande loi française sur l'or bleu, en 1964, visait alors à y remédier en plaçant acteurs et usagers autour d'une même table. Mais à partir des années 1990, un autre registre de tensions voit le jour à mesure que les autorités européennes et françaises, nourries par des dizaines de rapports scientifiques, reconnaissent « *l'importance de l'eau et des zones humides pour la biodiversité et la préservation du vivant* », recommandent de limiter les usages ou pollutions anthropiques… et, surtout, de conduire des études d'impact avant la construction d'ouvrages ou de pompages. Les frictions se multiplient partout sur le territoire. Puis survient l'irréparable. En octobre 2014, Rémi Fraisse, botaniste de 21 ans et opposant écologiste, succombe au tir d'une grenade offensive par un gendarme sur le chantier du barrage controversé mais légal de Sivens, sur le cours du Tescou, un affluent du Tarn dans le bassin de la Garonne. Le sociologue Edgar Morin tonne que le jeune militant a été victime d'« *une guerre de civilisation* ». Des exploitants ont depuis décidé de parer à « leur » urgence, en bravant cinq interdictions de justice. Entre 2018 et 2019, la Coordination rurale du Lot-et-Garonne construit une digue sur le site naturel de Caussade, pour se constituer une réserve de 920 000 m³ d'eau. « *C'est un vol d'eau qualifié, au profit de quelques irrigants et au détriment d'espèces florales et animales protégées, qui n'a valu aux délinquants que dix mois de prison avec sursis,* déplore France Nature Environnement. *Nous sommes dans une zone de non-droit,*

> « L'industrialisation progressive du pays aux XIXe et XXe siècles avait fait émerger de nouveaux besoins et autant de tensions »
>
> **Corinne Larrue,** professeure à l'université Paris-Est Créteil Val-de-Marne



Les différents types de retenues d'eau douce

LES RETENUES COLLINAIRES

Elles interceptent les eaux de ruissellement d'un versant et sont déconnectées du réseau hydrographique. On en compte plusieurs dizaines de milliers.

LES RETENUES ALIMENTÉES PAR UN CANAL

Leur alimentation se fait en dérivation d'un cours d'eau. Il existe aussi des réservoirs dérivant tout ou une partie d'une source alimentée par un aquifère.

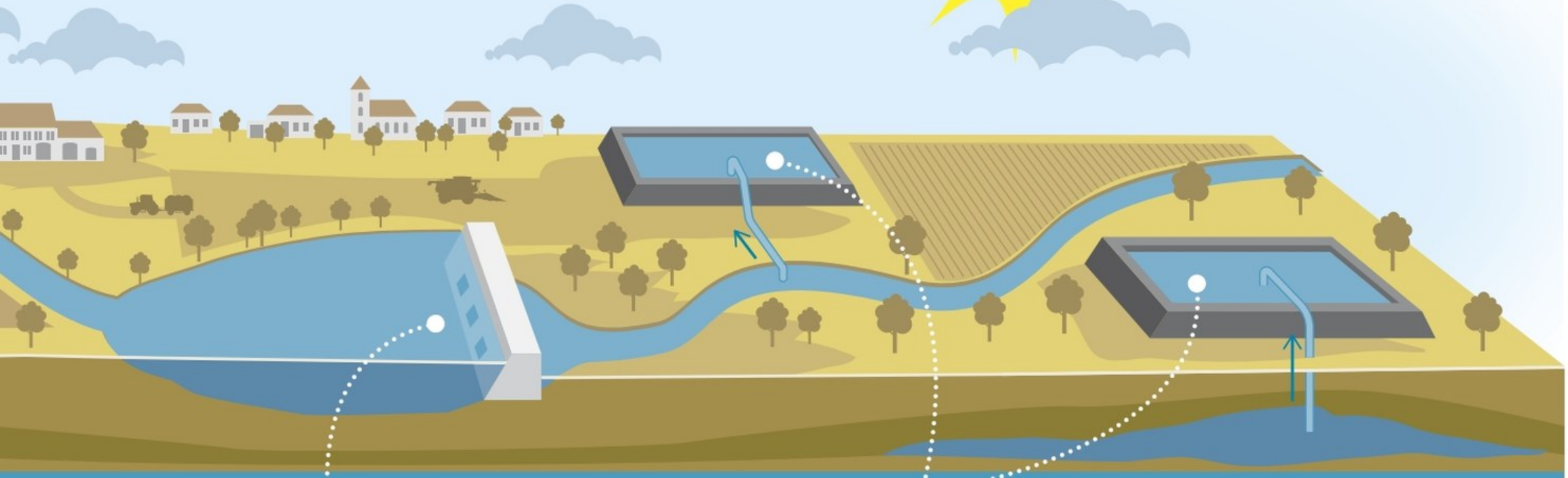
personne en France n'a l'envie ni la capacité de faire la police de l'eau. »
En juillet 2022, 400 m³ d'eau stockés en Ardèche pour les pompiers en cas de feux de forêts sont « empruntés » par un club de moto-cross pour arroser ses pistes. Quelques jours plus tard, des jacuzzis pour touristes sont lacérés dans les Vosges au motif que *« l'eau, c'est fait pour boire »*. À Toulouse, lors de ce même été caniculaire, Extinction Rébellion, un mouvement écologiste prônant la désobéissance civile, coule du béton dans chacun des trous d'un parcours de golf. Le ministère de l'Intérieur s'insurge contre *« l'écoterrorisme »*. La très mesurée Valérie Masson-Delmotte, coprésidente du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), dénonce, *« avec gravité »*, la plus que probable dissolution des Soulèvements de la Terre. Ce mouvement tient à jour une carte de France avec les projets de retenues d'eau qui lui paraissent contrevenir à l'environnement ou à l'intérêt général, appelant parfois à leur *« désarmement »*!

HYDROLOGIE

Les multiples expressions de la sécheresse

La sécheresse est souvent ressentie à travers ses effets : il n'y a pas assez d'eau pour arroser sa pelouse, remplir sa piscine, mais aussi pour refroidir les centrales nucléaires ou irriguer les cultures. Cependant, en hydrologie, on définit la sécheresse comme un niveau de la ressource en eau qui survient rarement, en général pas plus d'une fois tous les dix ans. Il y a plusieurs expressions de la sécheresse : le déficit de précipitations ou des vagues de chaleur (air chaud et sec), accompagnés d'une évapotranspiration importante entraînant de faibles niveaux d'eau dans les sols, dans les rivières ou dans les nappes. Toutes les sécheresses affectent les milieux naturels, avec la mortalité de la faune et de la flore. Les sécheresses les plus sévères, c'est-à-dire d'une forte intensité (déficit de la ressource important), impliquent des restrictions d'usage et peuvent conduire à des ruptures d'alimentation en eau potable, y compris au robinet.

Quelques chiffres permettent de prendre la mesure du problème. En France métropolitaine, la ressource en eau renouvelable (c'est-à-dire la totalité de l'eau douce qui entre sur le territoire par le cycle naturel et ne retourne pas dans l'atmosphère) a déjà diminué de 14 % entre les périodes 1990-2001 et 2002-2018, en raison notamment d'une baisse des pluies d'automne sur 49 % du territoire et d'une évapotranspiration qui augmente à toutes les saisons depuis 1959, selon des statistiques gouvernementales. De plus en plus de territoires sont classés en zones de répartition des eaux (ZRE), où est constatée une insuffisance des ressources hydriques par rapport aux besoins. Et la situation va s'aggraver, car les modélisations du dernier rapport du Giec prévoient plus de sécheresses, plus de vagues de chaleur et une température moyenne terrestre plus ▸



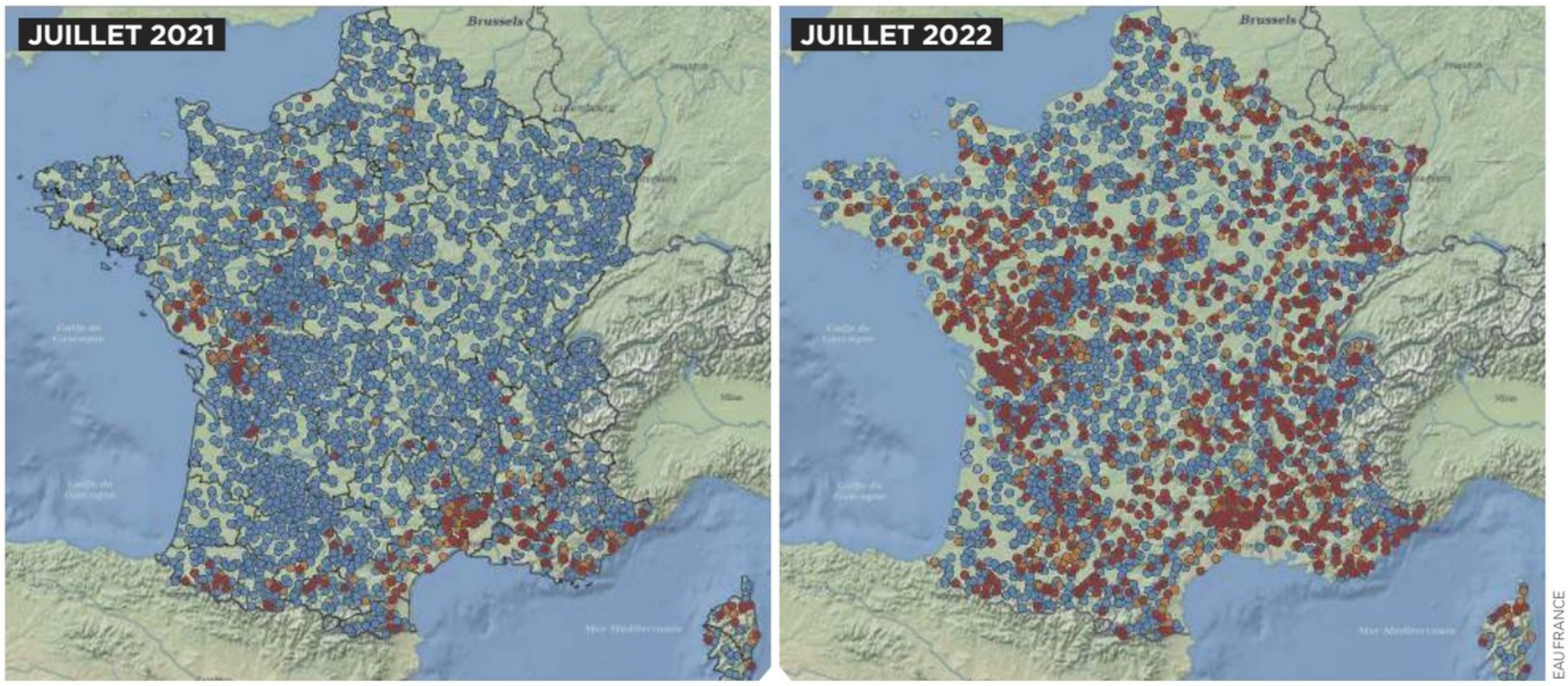
LES BARRAGES

▸ Ils sont construits sur les cours d'eau comme les barrages hydroélectriques. Les plus importants servent plusieurs usages : hydroélectricité, irrigation, tourisme, eau potable.

LES BASSINES

▸ Ces réserves sont alimentées par pompage, dans les rivières ou, le plus souvent, dans la nappe. Faute de relief pour adosser la « bassine », le sol est creusé, étanchéifié à l'aide de bâches en plastique et entouré de digues.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : ONEMA



L'étiage des cours d'eau français fait l'objet d'une surveillance par l'Observatoire national des étiages. Si, en juillet 2021, la plupart d'entre eux ont un écoulement visible (en bleu), en juillet 2022, beaucoup ont un écoulement non visible (orange) ou sont taris (rouge).

élevée. Les résultats du projet Explore 2070 (Irstea, Météo France, Onema, etc.) montrent que le débit moyen des rivières en France devrait diminuer fortement d'ici à trente ans, jusqu'à 50 % dans le Sud-Ouest et le Bassin parisien notamment, en lien avec le changement climatique. « *L'élévation de la température moyenne de l'air augmente l'évaporation de l'eau à partir des masses d'eau, du sol et des plantes et affecte le régime des précipitations : davantage de pluies fortes dans les zones tempérées et humides, avec une augmentation des pluies hivernales, moins de pluies dans les régions méditerranéennes et tropicales* », résume l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement). Le réchauffement accélère le cycle de l'eau avec plus d'évaporation et plus de pluies extrêmes qui convergent vers les océans sans recharger les nappes. Toutes les projections du Giec montrent qu'il y aura redistribution des ressources en eau, au niveau national comme au niveau mondial. Même si le volume total d'eau de la planète reste constant, il y a aura des risques de manque d'eau douce plus ou moins drastiques selon les territoires, les saisons et les années.

Une centaine de projets de réservoirs d'eau en France

Comment y remédier ? Cinq jours après Sainte-Soline, le président de la République Emmanuel Macron annonce son « *plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau, 53 mesures répondant aux grands enjeux de sobriété, disponibilité et qualité* », après l'un des hivers les plus secs jamais enregistrés en France. Fin mars, 75 % des nappes restaient sous les normales mensuelles, contre 58 % en mars 2022, année de terrible sécheresse, selon le BRGM (Bureau des ressources géologiques et minières). Le plan Eau parie fortement sur le recyclage et ne prévoit nullement de renoncer aux « méga-bassines », comme les appellent les opposants, plus techniquement des « réserves de substitution ». Différents des retenues collinaires *(voir l'infographie p. 48)*, ces cratères artificiels géants tapissés de plastique ne sont pas remplis par des pluies dont on éviterait l'écoulement vers la mer, comme le prétendent des partisans du stockage. L'eau de ces bassins — dont la superficie varie entre 8 et 18 hectares — est puisée dans les nappes phréatiques ou les cours d'eau entre novembre et mars pour remplacer les prélèvements l'été. Le gouvernement s'appuie sur un rapport de 2020, selon lequel les réserves de substitution sont « *le mode de sécurisation de la ressource en eau le plus satisfaisant* », fruit des analyses d'ingénierie du CGEDD (Conseil général de l'environnement et du développement durable) et du CGAAE (Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux).

« Chercher à pallier le manque d'eau par des infrastructures nouvelles occulte une partie substantielle du problème »

Florence Habets, hydrogéologue, institut Pierre-Simon-Laplace, CNRS

« *Apparues dans les années 1990, les réserves d'eau se multiplient,* reconnaît le ministère de l'Agriculture. *Il y a une centaine de projets en France, notamment dans les Deux-Sèvres (qui prévoit d'en construire 16, pour 6 millions de mètres cubes au total, équivalent à plus de 1500 piscines olympiques), la Vienne et la Vendée. Si elle s'intègre dans un projet de territoire pour la gestion de l'eau, la construction d'une retenue de substitution peut être subventionnée par les agences de l'eau.* » De l'argent public sert ainsi à privatiser un bien commun, rétorquent les opposants, alors que les chiffres sur les bénéficiaires de chacune des réserves varient drastiquement selon les sources.

Un rapport qui ne prend pas en compte le changement climatique

Dans le cas précis des projets des Deux-Sèvres, une simulation de juin 2022 du BRGM estime que les réserves auraient « *un impact négligeable* » sur les nappes souterraines et le débit des cours d'eau, et permettraient « *une amélioration globale du niveau des nappes en printemps-été* » ainsi qu'une augmentation du débit des cours d'eau de 5 % à 6 %. « *Ce rapport, basé sur un logiciel daté, ne prend pas en compte le changement climatique à venir, et ne peut prédire comment se rechargeront les nappes dans une France réchauffée* », répète à l'envi l'hydrogéologue Florence Habets, de l'Institut Pierre-Simon-Laplace et du CNRS. « *Chercher uniquement à pallier le manque d'eau par des infrastructures nouvelles (prises d'eau, retenues, mégabassines) et des réponses techniques (forage, pompage, dessalement, etc.), pour maintenir coûte que coûte les usages actuels,* a fortiori *dans un climat qui change et qui augmente le risque de sécheresses sévères, occulte une partie substantielle du problème, à savoir, justement, la nature des usages qui sont faits de cette eau* », critique-t-elle dans un article de vulgarisation de 2023 corédigé sur le site BonPote avec la géographe Magali Reghezza, et nourri par leurs années de publication scientifiques plus confidentielles. Les sociologues utilisent depuis une dizaine d'années la notion de « fix hydrosocial », en référence aux drogues, et l'infrastructure nouvellement construite fonctionne ainsi comme une dose, qui soulage momentanément le système jusqu'au prochain « fix ». À sa suite, des scientifiques de l'Office français de la biodiversité (requérant de la discrétion) ou de l'Inrae pensent que de tels ouvrages constituent des « *soins palliatifs, plutôt que curatifs* » qui ne feront que retarder la nécessaire transition agroécologique, à laquelle répugne « *un milieu connu pour son aversion au risque* ».

À ce jour, une seule étude a analysé la littérature scientifique sur l'impact cumulé des différentes retenues d'eau, pilotée en 2016 par Nadia Carluer, de l'Inrae. « *L'expertise a montré que la pré-*

FORAGES

Des industriels au régime sec

Début mai, après des années de bras de fer, et peut-être aidée par la sécheresse de l'été 2022, la ville de Grigny (Essonne) a fait plier la multinationale Coca-Cola, dont l'un des cinq sites de production en France se trouve dans sa commune, à 22 km de Paris. À l'origine de leur désaccord, le fait que l'usine puise, depuis son installation il y a 35 ans, environ 780 000 m³ d'eau annuellement dans la nappe phréatique située juste en dessous, soit l'équivalent de la consommation d'une ville de 15 000 habitants. Or, la commune de Grigny — alimentée de son côté par la Seine —, disposait d'une solution de substitution, avec la régie publique de l'eau de Grand Paris Sud, qui lui permettait d'abreuver le site d'embouteillage en eau potable en toute sécurité.

« *Le modèle est dépassé, il faut protéger la ressource aquifère* » pour le futur, assure la mairie. Un accord a été trouvé entre les parties, Coca-Cola rappelant de son côté qu'il avait toujours pompé en deçà des débits autorisés et avait réalisé des investissements lui permettant d'économiser 50 000 m³ annuels. Toujours en mai, Nestlé Waters, de son côté, a dû se mettre au régime sec dans les Vosges, suspendant deux forages d'Hépar (très appauvris) sur son site de Vittel-Contrexéville et annonçant un licenciement de 25 % de ses effectifs. Les délégués syndicaux sont furieux de ces décisions brutales, estimant que la multinationale aurait pu gérer différemment la ressource au cours des dernières années. L'eau en bouteille a-t-elle encore un avenir avec le changement climatique en cours ? Si les nappes continuent de diminuer, la rareté de ces breuvages pourrait encore en augmenter le coût.

SEBASTIEN CALVET/REA

L'usine Coca-Cola de Grigny (Essonne) a puisé 780 000 m³ d'eau par an dans la nappe phréatique pendant 35 ans.

sence de retenues sur un bassin-versant influence toujours le milieu aquatique, explique l'hydrologue. *Elles entraînent une modification du régime hydrologique, et une baisse des débits d'autant plus forte que l'année est sèche. Elles constituent des pièges à sédiments, en particulier pour les particules les plus grossières, ce qui induit une évolution du lit de la rivière (incision ou colmatage selon les cas). Les retenues entraînent en général un réchauffement du cours d'eau, et favorisent l'eutrophisation en leur sein (pouvant entraîner la prolifération d'algues et la production de toxines). Enfin, ces retenues modifient les communautés aquatiques, en changeant leurs conditions de vie et en réduisant la connectivité du milieu, et donc le déplacement des espèces dans le réseau hydrographique.* » Le mode d'alimentation d'une retenue (par pompage dans la nappe ou la rivière, par ruissellement, en dérivation du cours d'eau ou en barrage du cours d'eau) et son usage (eau prélevée ou pas) modulent ces effets, difficiles à quantifier quand de nombreuses retenues sont présentes sur un bassin-versant.

Agir sur la demande peut réduire les conflits entre usagers

De son côté, le Giec fait dans son rapport le constat que « *les réservoirs peuvent être une solution efficace dans certains contextes (notamment dans le sud de l'Europe où beaucoup sont déjà installés et permettent d'irriguer), mais qu'ils coûtent cher, peuvent avoir des effets négatifs sur les écosystèmes et ne seront pas efficaces partout, dans un contexte de réchauffement climatique induisant une augmentation de l'évaporation et de la transpiration* », précise Gonéri Le Cozannet, l'un de ses coauteurs. De plus, les réservoirs peuvent créer des inégalités d'accès à la ressource en eau entre usagers et, lorsqu'ils sont utilisés pour l'irrigation, peuvent intensifier la dépendance à l'eau. Le rapport rappelle également qu'agir sur la demande peut réduire les conflits entre usagers et présente d'autres solutions (agroécologie, agroforesterie, systèmes mixtes et diversifiés, alimentation moins carnée) qui peuvent réduire structurellement la demande en eau et améliorer la qualité des eaux de surface, et, selon les contextes, des eaux souterraines. « *Mais si l'on veut développer ces transformations, il faudra davantage les soutenir par des politiques publiques appropriées* », précise-t-il. « *Je pense que la multiplication de ce type de projets pourrait bien être une pratique de mal adaptation* », conclut Gonéri Le Cozannet. De quoi aggraver la vulnérabilité au changement climatique et aux risques de pénuries d'eau. Et *in fine* perpétuer des usages non durables de la ressource en eau. La guerre de l'eau ne fait hélas que commencer. ■

Rachel Mulot @RachelFleaux

FLORIAN LAUNETTE/LA PROVENCE / MAXPPP

La France est le deuxième pays le plus équipé en piscines privées, derrière les États-Unis (ici entre Port-Grimaud et Saint-Tropez, dans le Var).

RÉGLEMENTATION

Piscines : une mesure hors-sol ?

Le 10 mai, les Pyrénées-Orientales ont été placées en « crise sécheresse », le niveau d'alerte le plus élevé. Face au manque de pluie, la préfecture a mis en place de nombreuses restrictions destinées à éviter le risque de rupture d'alimentation en eau potable. Interdiction de remplir sa piscine, d'arroser sa pelouse, de nettoyer sa terrasse, de laver son véhicule, d'utiliser un jacuzzi, fermeture des fontaines publiques et privées… L'hiatus est venu du ministre de la Transition écologique, Christophe Béchu, qui, lors d'une visite sur place, a annoncé l'interdiction de la vente des piscines hors-sol dans le département. Une mesure critiquée pour son manque de justice sociale alors que la construction des piscines enterrées — plus onéreuses — reste autorisée. Une piscine enterrée consomme en moyenne 15 m³ d'eau chaque année contre 6,5 m³ pour les formats hors-sol. Joëlle Pulinx, déléguée générale de la Fédération des professionnels de la piscine, appelle à ne pas faire des piscines « *le bouc émissaire* » de la sécheresse. « *Les 3 millions de piscines privées en France ne représentent que 0,15 % de l'utilisation de l'eau au niveau national, soit environ 40 millions de m³ par an. Pour avoir une idée de grandeur, les fuites d'eau sur le réseau français représentent un gaspillage d'au moins 1 milliard de m³ d'eau par an.* » Les spécialistes rappellent aussi que les piscines ne sont pas vidées et reremplies chaque année, mais plus simplement remises à niveau et nettoyées, non sans l'aide de filtres et de pompes énergivores.

Des innovations pour cultiver mieux avec moins d'eau

Changer les techniques d'irrigation, la saison des semis, le choix des espèces cultivées : face à la pénurie de la précieuse ressource, les progrès de l'agronomie ne suffisent plus. Seule l'intégration des outils numériques permettra de maintenir les rendements avec toujours moins d'eau.

Produire autant avec moins. C'est le défi majeur auquel doit faire face l'agriculture dans le monde entier. Tout l'enjeu est de maintenir des rendements de culture assez élevés pour sauver l'équilibre économique des exploitations, tout en réduisant les apports en eau pourtant indispensables à la croissance des plantes. C'est une *« chasse au gaspi »* de grande échelle qui est menée partout sur la planète confrontée à des sécheresses plus fréquentes et plus intenses, conséquences du changement climatique en cours. Scientifiques et ingénieurs qui travaillent sur les besoins des plantes et les systèmes d'irrigation sont aujourd'hui extrêmement sollicités tant par les gouvernements que par les filières agricoles. Au niveau mondial, 70 % de la ressource en eau est utilisée pour l'agriculture. Une statistique qui, en soi, ne dit pas grand-chose puisqu'elle mélange les zones équatoriales humides, les climats tempérés technologiquement développés et les régions semi-désertiques qui abritent deux milliards d'humains dont plus de la moitié sont des agriculteurs. *« Dans ces régions, c'est encore le système gravitaire qui domine, c'est-à-dire la distribution de l'eau par canaux en profitant des pentes »*, détaille Bruno Cheviron, coanimateur du réseau « systèmes agricoles et eau » à l'Institut national pour la recherche sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Ces techniques millénaires assurent un partage équitable de l'eau entre les cultivateurs mais ne permettent pas d'optimiser l'usage de la ressource ni de faire coïncider les besoins des plantes avec leur arrosage. Au moyen des pompes et moteurs coïncidant avec la « révolution verte » des années 1950, l'agriculture des pays développés a opté pour des techniques par aspersion. Les canons-enrouleurs, les pivots et les rampes permettant d'arroser les cultures font ainsi partie du paysage rural depuis des décennies. En France, 90 % des 2 millions d'hectares de cultures irriguées sont ainsi arrosés par aspersion. Selon les experts, passer du gravitaire à l'aspersion fait économiser 60 % de la ressource. *« L'aspersion permet de remonter les pentes grâce aux pompes, d'atteindre toutes les parcelles et de couvrir de plus grandes surfaces. L'inconvénient, c'est que cela dépense de l'énergie. Or la flambée récente des coûts*

VIVIANE DALLES / DIVERGENCE

90 % des cultures irriguées en France sont arrosées par aspersion (ici oignons en terrasse à Taleyrac, dans les Cévennes).

des carburants incite les agriculteurs à raisonner leur irrigation », explique Bruno Cheviron.

La troisième voie est la plus récente : c'est la micro-irrigation. L'eau est acheminée par un réseau de tuyaux jusqu'au pied des plantes où elle est appliquée goutte à goutte. Ces tuyaux peuvent être installés en surface ou enterrés. Dans les deux cas, cela implique que les parcelles équipées ne peuvent pas entrer dans des rotations de culture. La technique concerne donc principalement l'arboriculture et le maraîchage, des cultures à forte valeur ajoutée qui justifient des investissements plus importants. Le goutte à goutte permet d'économiser 25 % d'eau par rapport à l'aspersion. Depuis les années 1980, de très nombreux travaux ont été menés pour améliorer les engins par aspersion, notamment en optimisant la dispersion des gouttelettes d'eau et en orientant mieux les angles d'arrosage des canons. Mais ces progrès techniques plafonnent et, surtout, ne permettent plus de répondre aux enjeux du changement climatique. La hausse des températures, une pluviométrie plus erratique et des périodes de sécheresse plus longues bousculent les habitudes des irrigants. Si, en France, la part des terres irriguées est de 12 % (contre 73 % au Portugal, 61 % en Espagne, et 24 % en moyenne en Europe), 90 % des prélèvements s'effectuent en fin de printemps et en été, lorsque les rivières sont à l'étiage et les nappes phréatiques au plus bas. Ainsi, le plan sécheresse 2023 du gouvernement interdit-il toute irrigation par aspersion entre 9 heures et 20 heures cet été en cas d'alerte renforcée. La situation est particulièrement dramatique en Nouvelle-Aquitaine où la hausse moyenne des températures est en train de « méditerranéiser » un climat auparavant océanique, ainsi que le décrit l'étude de l'agence de l'eau Adour-Garonne dans une prospective à 2050, avec des conséquences irréversibles sur la biodiversité et les cultures.

FRANÇOIS HENRY/REA

Le sorgho (ici dans la vallée de l'Isère, en 2022) est cultivé en remplacement du maïs, bien trop gourmand en eau.

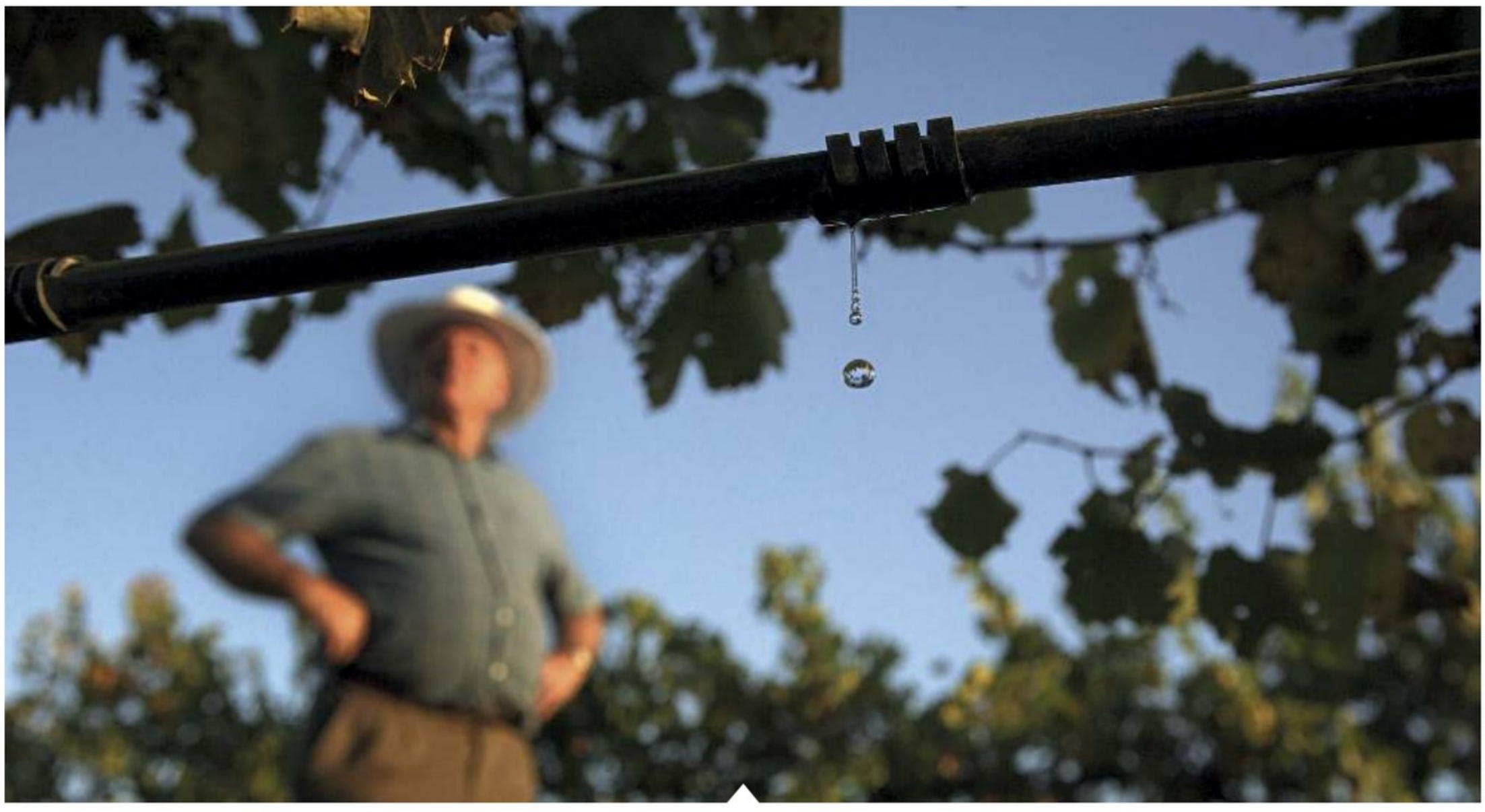
Des outils numériques pour affiner les pratiques

Que ce soit à Sivens dans le Tarn ou à Sainte-Soline dans les Deux-Sèvres, ces conflits entre agriculture et société sont les marqueurs d'un changement local profond du couvert végétal et de son exploitation par l'humain. *« C'est pourquoi les économies passent aussi par un deuxième levier, un changement de stratégie agronomique* », statue Bruno Cheviron. Dans un premier temps, les irrigants ont été contraints et forcés de respecter des règles strictes d'usage. Ce fut d'abord des interdictions d'arroser en plein jour, puis, année après année, ont été instaurés des « tours d'eau », quotas imposés exploitation par exploitation. Depuis 2014, l'Union européenne refuse tout soutien à l'investissement d'un nouveau système d'irrigation s'il ne garantit pas de 5 à 25 % de réduction des besoins selon les installations. Mais les stratégies portent aussi sur la gestion des cultures. Ainsi, les semis à l'automne permettent de diminuer le besoin de céréales, qui peuvent par ailleurs être moissonnées plus tôt dans l'été. Des cultures très gourmandes comme le maïs commencent même à être remplacées par le sorgho. L'Inrae mène actuellement des travaux pour mesurer les gains en eau de techniques comme celle — sans labour — de conservation des sols, ou encore de l'agroforesterie.

DONNÉES HYDRIQUES

Les satellites à la rescousse

Les satellites permettront-ils bientôt de fixer les besoins en eau des cultures et, surtout, les surfaces qui ont été irriguées ? *« Les données satellitaires informent déjà de l'état général du couvert végétal,* explique Nicolas Baghdadi, chercheur à l'Inrae. *Les satellites européens Sentinel du programme Copernicus nous donnent désormais accès à la teneur en humidité des sols.* » L'idée est donc de coupler les données de télédétection obtenues conjointement par les imageries radar et optique. Les deux technologies associées effacent l'obstacle des nuages par exemple, ce qui permettra à terme de fournir des informations sur l'état d'humidité des sols, actuellement sur une fourchette de 5 jours. Ce laps de temps est aujourd'hui trop important puisqu'en été, un sol arrosé met moins de 3 jours à s'assécher. Mais les chercheurs estiment pouvoir très bientôt donner une idée très précise de l'usage de l'eau par l'agriculture. Et dénoncer ainsi ceux qui ne respecteraient pas les règles du jeu des quotas, lesquels devraient se durcir au fur et à mesure que les températures grimperont. **L. C.**



AMY TOENSING/GETTY IMAGES

La technique du goutte à goutte mise en place en 2002 dans les exploitations viticoles de Loxton, dans une région d'Australie-Méridionale en proie à la sécheresse, a permis d'économiser environ 25 % d'eau par rapport à l'ancien système d'aspersion.

La nouvelle étape, c'est l'intégration du numérique, car les techniques actuelles sont dans une impasse. « *Les économies d'eau potentiellement réalisables en passant de l'aspersion à un système localisé d'irrigation sont limitées, voire impossibles, lors des années très sèches,* assène Claire Wittling, ingénieure à la Plateforme de recherche et expérimentation en sciences et technique de l'irrigation (Presti) de l'Inrae. *Au contraire, le pilotage de l'irrigation à l'aide de sondes donnant l'état hydrique du sol permet des économies d'eau moins dépendantes des conditions climatiques.* » L'idée est donc de mieux comprendre les besoins des plantes afin d'y répondre le plus précisément possible. « *Il s'agit d'apporter à l'agriculteur des informations comme la disponibilité en eau des sols et l'état de la culture à l'échelle de la parcelle afin de déterminer la bonne et suffisante dose à apporter* », table Bruno Cheviron. Le laboratoire Optimisation du pilotage des technologies de l'irrigation, minimisation des intrants, transferts dans l'environnement (Optimiste), qu'il anime, est ainsi à l'origine du développement du modèle « Optirrig », en cours de test avant une commercialisation prévue dans les deux prochaines années. Il s'agit d'intégrer des modèles de croissance d'une plante au contexte pédologique, agronomique, météorologique et climatique dans lequel elle croît. Une démarche qui fait l'objet de très nombreux essais en champ et en laboratoire pour nourrir les algorithmes d'une multitude de données permettant de faire face à un éventail très large de circonstances lors de la saison de croissance de la culture. La prochaine génération d'agriculteurs devrait donc combiner à la fois des stratégies agronomiques incluant la biodiversité (haies, arbres) régulant et conservant dans les sols les eaux de pluies, et les outils de l'intelligence artificielle : capteurs d'humidité et de besoins en azote au bord des parcelles, suivi par satellite de l'avancée des cultures, aide à la décision d'irrigation ou de fertilisation directement et clairement accessible sur smartphone. Et passer ainsi de « l'eau quand je veux » à « l'eau quand il faut ». ■

Loïc Chauveau @Loïc_Chauveau

CLAIRE WITTLING

« Le pilotage de l'irrigation à l'aide de sondes donnant l'état hydrique du sol permet des économies d'eau »

Claire Wittling, ingénieure à la Plateforme de recherche et expérimentation en sciences et technique de l'irrigation de l'Inrae

Quel prix donner à l'eau ?

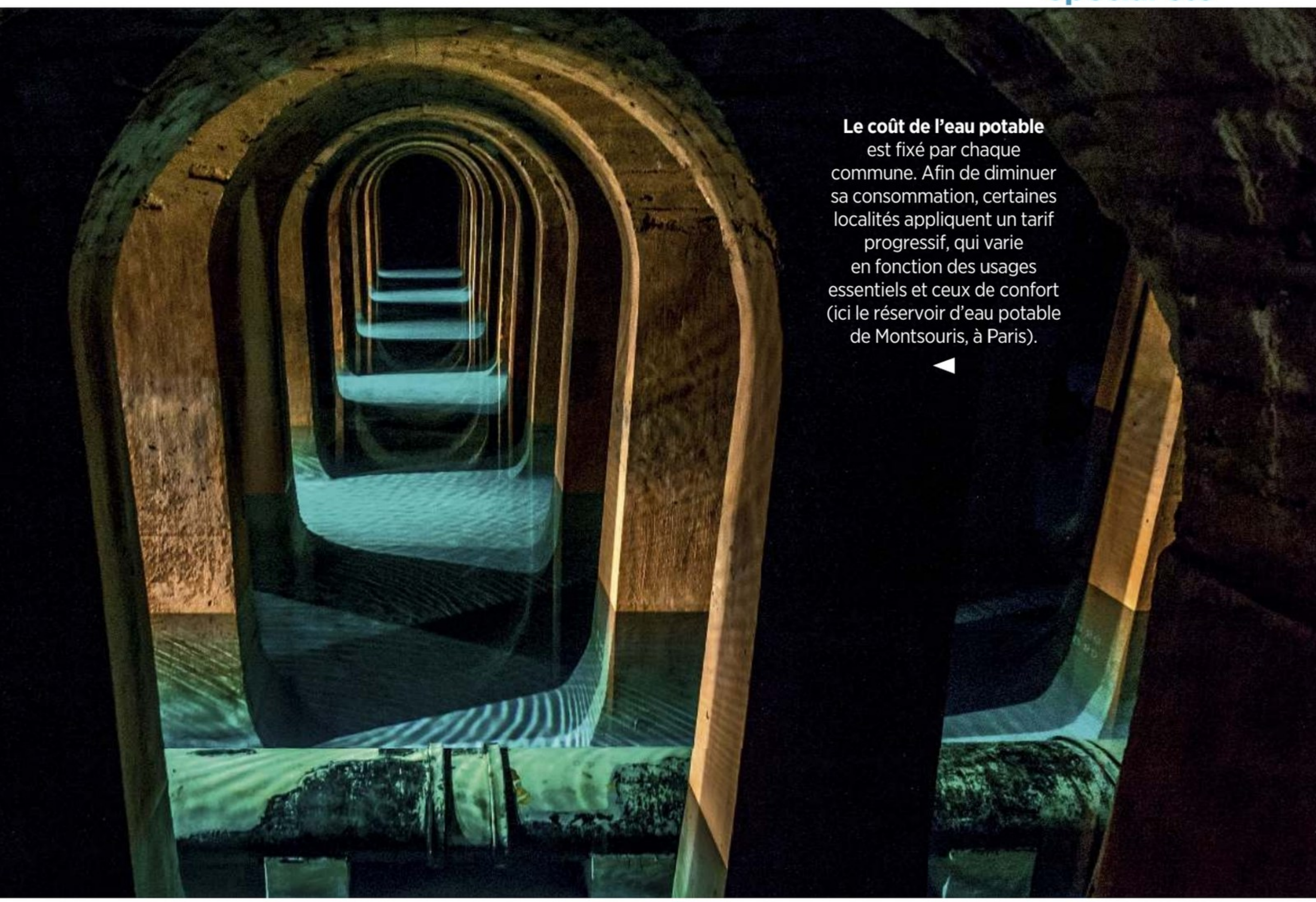
Le gouvernement veut appliquer une « tarification progressive et responsable » pour inciter à la sobriété et garantir aux usagers les plus modestes un accès à une ressource de qualité. Mais les exemples d'une marchandisation de l'eau à l'étranger laissent sceptiques de nombreux experts.

L'été commence à peine et déjà, nombre de cours d'eau et de nappes phréatiques de l'Hexagone affichent des niveaux historiquement bas. Alors qu'ils ont été éprouvés par la sécheresse exceptionnelle de l'été et de l'hiver 2022, les pluies printanières n'ont pas suffi à les réalimenter. Depuis des semaines, les arrêtés de restriction se multiplient de façon à prévenir et limiter autant que possible le risque de pénurie d'eau potable. Cette situation, à laquelle font face bien d'autres pays, ravive les clivages dans la société sur la valeur et les usages acceptables d'une ressource qui se raréfie de plus en plus sous la double pression humaine et climatique *(lire p. 46)*. S'il est évident pour tout le monde que l'eau est vitale et irremplaçable, les avis divergent sur les leviers à appliquer pour la préserver. Faut-il lui attribuer plus de valeur ? Doit-elle rester un « *patrimoine commun de la Nation* » ainsi que le dit le code de l'environnement, par essence inestimable, et auquel chacun doit pouvoir accéder pour couvrir ses besoins essentiels ? Ou être considérée comme un « bien économique » au risque de devenir, comme le pétrole, le blé ou le maïs, une denrée monnayable et plus chère ?

Si la ressource n'a pas de prix en soi, son prélèvement, sa potabilisation, son acheminement jusqu'aux fontaines ou aux robinets ont en revanche un coût qui doit être couvert d'une façon ou d'une autre. « *Le principe est que l'eau doit payer l'eau* », souligne Céline Nauges, directrice de recherche à l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement). Ce sont les usagers qui financent ce service en fonction de leur consommation. L'eau étant une ressource locale, le prix est fixé par chaque collectivité qui y ajoute diverses redevances décidées par les Comités de bassin et destinées à compenser les coûts indirects engendrés par les usages de l'eau, notamment la pollution et la réduction de la ressource induite par le prélèvement.

Un indicateur de sa valeur d'usage réelle

Les secteurs les plus gourmands que sont l'agriculture et l'industrie bénéficient de tarifs comparativement plus avantageux que les ménages, en raison notamment de prix et de redevances

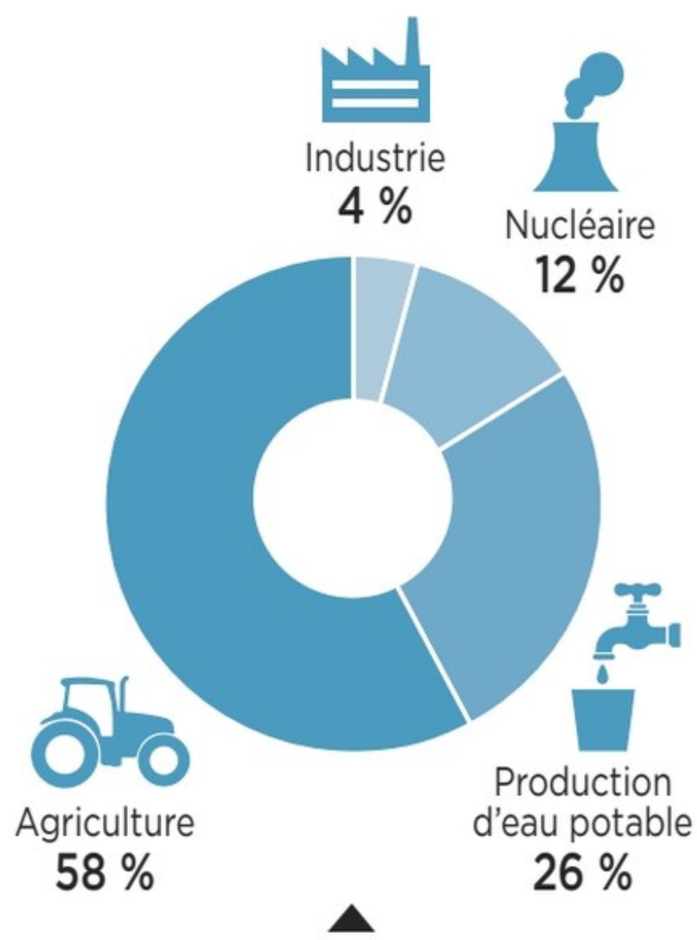


Le coût de l'eau potable est fixé par chaque commune. Afin de diminuer sa consommation, certaines localités appliquent un tarif progressif, qui varie en fonction des usages essentiels et ceux de confort (ici le réservoir d'eau potable de Montsouris, à Paris).

GILLES ROLLE/REA

moindres ou de subventions compensatrices. Mais ce mode de gestion n'est plus adapté à la raréfaction et à la dégradation de la ressource. « *Pour responsabiliser les usagers et les inciter à faire des choix raisonnés en matière de consommation et de pratiques, notamment en agriculture, le prix de l'eau doit être un bon indicateur de sa valeur d'usage réelle. Laquelle augmente avec la rareté* », insiste l'économiste.

Mais comment fixer un « juste prix » pour, à la fois, inciter à la sobriété et garantir aux usagers les plus modestes un accès à une ressource de qualité ? Pour les usages domestiques, le gouvernement a récemment décidé d'appliquer une « *tarification progressive et responsable* ». Cette mesure, qui figure dans le Plan de gestion de l'eau dévoilé



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'agriculture représente le secteur qui consomme le plus d'eau en France, loin devant la production d'eau potable.

en mars par Emmanuel Macron, est expérimentée depuis 2012 dans une dizaine de communes françaises, à Dunkerque, Montpellier, Bordeaux ou encore Libourne. Le principe est simple : les premiers mètres cubes destinés aux usages essentiels sont facturés à un prix modeste, proche du prix coûtant, qui augmente ensuite par paliers pour les consommations de confort. Le but étant d'inciter les usagers à changer leurs pratiques et à réduire leur consommation. Mais pour Céline Nauges, cette tarification est loin d'être la solution miracle. « *Il y a cette idée que les plus gros consommateurs d'eau, ceux qui vont payer le prix fort, sont les plus riches. Et que leur contribution permet de subventionner l'eau des plus modestes. Mais la consommation est calculée par foyer,*

BERTIHANNA/REA

Des opérations pilotes sont menées afin de quantifier les prélèvements en eau des agriculteurs pour l'irrigation avec l'installation de compteurs connectés (ici dans la Vienne).

si bien qu'une famille nombreuse défavorisée sera plus pénalisée qu'une personne seule dotée de revenus importants. Sans compter que la mesure risque de n'avoir que peu d'effets sur ceux qui ont les moyens de se payer une consommation d'eau démesurée ou de se passer du réseau en forant un puits, par exemple. Son impact social reste donc très faible. »

Et si la tarification progressive peut inciter certains usagers à moins gaspiller l'eau, elle rate sa véritable cible. Car seul l'usage domestique est visé, pas le secteur de l'agriculture qui accapare pourtant 60 % de l'eau consommée… La solution passe-t-elle, pour ces gros consommateurs, par une « marchandisation » de l'eau ? « *Au début des années 1980, l'économiste néolibéral américain Terry Anderson et bien d'autres à sa suite ont postulé que c'est la rareté qui fait la valeur de l'eau. Laquelle peut de ce fait être considérée comme un bien économique pouvant être divisé, approprié, marchandisé,* explique Olivier Petit, maître de conférences en économie à l'université d'Artois. *Dans la foulée, des marchés locaux de droits de l'eau ont été expérimentés dans différents États américains, notamment en Californie, afin de réguler l'utilisation de la ressource par les agriculteurs irriguant en période de sécheresse. L'Australie, le Chili, le Mexique ou encore l'Espagne leur ont emboîté le pas.* » Pour Céline Nauges, ces marchés sont un bon moyen de révéler un prix de l'eau ajusté au contexte de rareté. « *En période de sécheresse, les agriculteurs peuvent vendre l'eau qui leur est allouée sous forme de quotas, ou en acheter des quantités supplémentaires. Et c'est l'équilibre de l'offre et de la demande qui fixe le prix, lequel fluctue d'une année sur l'autre en fonction de la disponibilité de la ressource.* »

En Australie, dans le bassin Murray-Darling, qui s'étire sur 1 million de km² dans le sud-est du pays et consomme quelque 60 % de toute l'eau disponible dans le pays pour l'agriculture irriguée, ces marchés sont très actifs. « *En période de pénurie, ils permettent d'utiliser l'eau là où elle a le plus de valeur, par exemple sur les cultures pérennes (vignes, vergers) qui ne peuvent être privées d'arrosage sous peine de perdre le capital végétal. Les agriculteurs qui font du riz ou une autre céréale vont, eux, vendre leurs droits, ce qui leur rapporte plus en une année sèche que le produit d'une culture annuelle.* »

FINANCE

Le premier marché à terme de l'eau

C'est la forme ultime de marchandisation d'un bien commun. Depuis le 7 décembre 2020, l'eau de Californie est devenue un actif financier au même titre que le blé, le maïs ou le riz. Le Chicago Mercantile Exchange (CME), l'un des principaux marchés à terme américains, propose en effet des contrats indexés sur l'abondance des précipitations. Dans un contexte de rareté de la ressource, les grands consommateurs — agriculteurs, industriels et villes — peuvent anticiper la disponibilité de l'eau et se protéger ainsi contre les fluctuations de son prix. « *Ce mécanisme est loin d'avoir fait ses preuves. Le volume de transactions reste d'ailleurs bas,* estime Olivier Petit, maître de conférences en économie. *Seul avantage : ces contrats à terme sont une façon pour une commune, une municipalité, qui de toute manière aurait recours à une transaction pour acquérir des droits de l'eau, de sécuriser l'approvisionnement de sa population et de prévoir le coût engendré à un horizon de six mois.* »

Mettre en place des garde-fous pour éviter la spéculation

Destinés prioritairement aux agriculteurs, ces marchés ont progressivement été étendus aux municipalités pour leur alimentation en eau potable, et même aux États fédérés et aux ONG. « *Ils peuvent ainsi acquérir des droits d'eau pour pouvoir maintenir le débit des cours d'eau dans une visée de préservation de la ressource et de l'environnement afin d'éviter que tout soit pompé* »,

complète Olivier Petit. Ailleurs, l'efficacité de ces marchés de droits d'eau reste toutefois limitée. « *En Californie, une étude a montré que seulement 4 % des volumes d'eau mobilisés pour les différentes utilisations à l'échelle de l'État transitaient par eux. Le coût des transactions, celui des infrastructures de dérivation de cours d'eau et de canaux nécessaires aux transferts font que le prix payé ne correspond pas au prix de l'eau mais davantage à celui des investissements engagés* », tempère le chercheur. Plus grave : ces marchés, qui permettent au plus offrant de s'approprier la ressource, nécessitent pour lui la mise en place de garde-fous afin d'éviter les bulles spéculatives potentiellement dangereuses. « *Accepter ces instruments marchands, c'est reconnaître un droit de disposer d'une ressource vitale par des individus, des collectifs ou des secteurs d'activité au détriment des plus vulnérables. Ces marchés doivent venir en complément d'autres outils de gestion et de régulation des ressources, mais pas pour donner une valeur à l'eau, laquelle est inestimable.* » En 2014, la Californie a par exemple aussi mis en place le Sustainable Groundwater Management Act, une loi dont l'objectif est de limiter les prélèvements afin de réduire les volumes consommés. « *L'une des plus ambitieuses en matière de régulation des usages des eaux souterraines à l'échelle internationale* », note Olivier Petit, même si cela n'a pas empêché encore cette année le gouverneur de Californie d'annoncer la construction de nouvelles infrastructures de stockage et de dérivation de l'eau pour faire face aux épisodes de sécheresse…

UNIVERSITÉ DE LILLE

« Il est préférable de reconnaître l'eau comme un patrimoine commun et d'avoir une gestion collective »

Olivier Petit, maître de conférences en économie à l'université d'Artois

Adopter la sobriété dans l'utilisation de la ressource

En dépit de discussions récurrentes depuis les années 1990, il est pour l'heure impossible de créer de tels marchés sur le territoire français. Il faudrait en effet, comme l'ont fait la Californie, l'Australie ou le Chili, réformer le cadre juridique et réglementaire du droit d'accès aux ressources et dissocier les droits sur le sol de ceux sur l'eau. Sans compter que la hausse du prix de l'eau qui en découlerait serait socialement inacceptable. « *Et moralement, peut-on vraiment monnayer l'accès à une ressource considérée comme indispensable ?* interroge l'économiste. *Il est préférable de reconnaître l'eau comme un patrimoine commun et avoir une gestion collective, des tarifications sociales, limiter les usages de l'eau dans la mesure du possible, penser à quelles fins utiliser cette eau…* » Pour lui, le débat sur le prix de l'eau est mal posé. « *Plutôt que d'essayer sans cesse d'accroître l'offre comme on le fait depuis une trentaine d'années, il faut adapter notre demande à l'offre et rationner les usages en fonction d'une quantité d'eau donnée* », estime-t-il. Force est de constater que le nouveau Plan de gestion de l'eau ne va pas dans ce sens : réutilisation des eaux usées, construction d'usines de désalinisation de l'eau de mer, de nouveaux barrages ou de canaux pour les transferts massifs d'eau d'une région à l'autre, mégabassines, etc. « *Cette politique d'accroissement de l'offre ne tient pas compte de la raréfaction,* déplore Olivier Petit. *C'est juste une course en avant pour avoir plus de productivité autour de la ressource, mais sans adopter de sobriété que l'on serait bien inspiré de devoir suivre. Est-il vraiment raisonnable que des agriculteurs irriguent des champs de maïs dans le sud de la France ? Il faut que les pouvoirs publics ou l'ensemble des usagers puissent émettre des règlements qui incitent à limiter des usages aberrants par rapport à la quantité d'eau disponible aujourd'hui.* » Sans aller jusqu'à faire de l'eau une marchandise, Céline Nauges estime pour sa part que « *les gestionnaires doivent aussi penser les prix de l'eau comme un indicateur de sa valeur et de sa rareté et, surtout, mettre fin pour des raisons d'équité aux règles d'exception qui conduisent à vendre l'eau en deçà de sa valeur à certaines catégories d'usagers* ». ■

Fabienne Copreaux

THEDROPSTORE

VALEUR

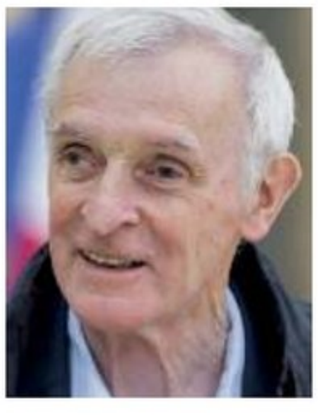
De l'eau à prix d'or…

Cinq grains de riz pour 89,95 dollars, une tranche de pain à 239 dollars, 15 ml d'eau pure pour 198 dollars… Pour alerter le public sur l'impact économique des pénuries d'eau, le ministère des Affaires étrangères des Pays-Bas et Publicis NL ont lancé une boutique en ligne fictive, TheDropStore, à l'occasion de la Conférence des Nations unies sur l'eau qui s'est tenue à New York en mars. Elle propose une gamme de produits du quotidien à des prix censés refléter la valeur de l'eau dans un monde où celle-ci serait rare que ce soit en raison de la sécheresse, de la pollution, d'inondations…

L'ère annoncée des inondations catastrophiques

Le réchauffement climatique va s'accompagner d'inondations de plus en plus fréquentes. Car les études montrent que la hausse de la température entraîne davantage de précipitations et de plus forte intensité. Exemples en Allemagne et au Pakistan.

Elle a été nommée « Bernd » et toute l'Allemagne s'en souvient encore. Bernd est la tempête qui a frappé la Rhénanie du Nord-Westphalie à la frontière avec la Belgique les 14 et 15 juillet 2021. Elle a tué 200 personnes, coupé des routes, dévasté des maisons, provoquant des milliards d'euros de dégâts. La configuration météo n'était pourtant pas exceptionnelle. Une goutte d'air froid provoquée par un anticyclone bloqué sur la Scandinavie pendant plusieurs jours, impactée par une dépression nord-atlantique qui à son passage aspire de l'air chaud provenant de Méditerranée. Mais cette fois, le système météo est resté focalisé sur les régions allemandes. Le 14 juillet, la région de Cologne reçoit ainsi 154 millimètres d'eau, soit l'équivalent de deux mois de pluies en douze heures!
Aurait-il plu autant si la température globale de la planète n'avait pas grimpé de 1,1 °C ces deux cents dernières années? C'est cette question de « l'attribution » d'un événement météo violent mais ponctuel à un phénomène climatique global que tentent de résoudre les climatologues depuis la création d'un groupe de travail consacré à ce sujet en 2014. Démêler ces influences n'est pas simple. La formation des tempêtes dépend de variables de grande échelle. Ce sont, entre autres, les phénomènes d'El Niño pour le bassin pacifique, et l'oscillation nord-atlantique pour le continent européen, où les tempêtes principalement hivernales sont formées par les différences de pression atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. « *Il est difficile de séparer les effets du changement climatique de cette variabilité naturelle* », écrivent les auteurs du sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) paru en août 2021. Néanmoins, « *la chaleur latente peut renforcer les tempêtes* », poursuivent les chercheurs, selon la formule de Clausius-Claperon qui donne les conditions de pression et de température nécessaires pour la transformation d'un gaz en liquide, ici de la vapeur d'eau en eau. « *Plus de chaleur dans le*


SIPA

« Plus de chaleur dans le système hydrique, c'est plus d'énergie et donc plus de puissance »

Jean Jouzel, paléoclimatologue, membre du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec)

RHEIN-ERFT-KREIS/DPA/ ZUMA PRESS/ REA

En douze heures, le 14 juillet 2021, la région de Cologne (Allemagne) a reçu au cours de la tempête « Bernd » 154 ml d'eau, l'équivalent de deux mois de pluies. Ici, la commune dévastée de Erftstadt-Blessem.

système hydrique, c'est plus d'énergie et donc plus de puissance », résume depuis des décennies le climatologue Jean Jouzel.

La hausse des précipitations touche tous les continents

Dans le cas de Bernd, les chercheurs réunis au sein du groupe international World Weather Attribution se sont concentrés sur trois bassins-versants particulièrement affectés par les pluies : les rivières allemandes de l'Ahr et de l'Erft et la partie belge de la Meuse. Les 14 et 15 juillet 2021, les volumes de précipitations sur ces petites régions ont explosé tous les records enregistrés dans le passé par une marge immense. Il est très difficile de calculer l'occurrence d'un tel événement sur une zone si restreinte, aussi les chercheurs ont utilisé les données d'événements similaires intervenus dans les régions comprises entre le nord des Alpes et les Pays-Bas. Et sur la base de ces mesures, ils ont fait tourner leurs modèles climatiques, les uns avec la température telle qu'elle était en 1850, les autres avec celle d'aujourd'hui. Cette comparaison montre que non seulement les précipitations augmentent avec la hausse de la température, mais aussi qu'une telle intensité, estimée ne pouvoir se reproduire que tous les 400 ans dans un climat plus froid de 1,2 °C, pourrait arriver deux fois plus souvent avec le réchauffement acquis depuis 1850. À +2 °C, l'intensité des pluies devrait encore augmenter de 0,8 à 6 % et l'intervalle entre chacune se réduire. *« Toutes les preuves disponibles réunies, y compris notre connaissance du système physique, les observations sur des régions plus grandes et les différents modèles régionaux donnent une haute confiance dans le fait que le changement climatique induit par l'humain a augmenté la fréquence et l'intensité de tels événements, et ces évolutions vont continuer dans un réchauffement climatique rapide* », concluent les chercheurs dans le résumé de leurs travaux.

Les preuves que les moussons africaines et indiennes sont désormais également influencées par le changement climatique s'accumulent aussi. En juillet et août 2022, le Pakistan a ainsi été inondé sur une grande partie de son territoire par des pluies diluviennes. L'avancée de l'eau est telle qu'un an plus tard, une grande partie des 33 millions de personnes déplacées n'ont pu rejoindre leurs villages ou retrouver intactes des maisons dont

FAREED KHAN/AP/SIPA

En été 2022, des pluies diluviennes ont détruit 1,7 million de maisons au Pakistan, un pays peu préparé à ce type de catastrophe.

1,7 million ont été détruites. Des milliers d'agriculteurs n'ont par ailleurs toujours pas accès à des terres inondées sur 18 000 km². *« Une injustice brutale »* selon le secrétaire général de l'ONU, António Guterres. Injustice car le Pakistan n'est responsable que de 1 % des émissions totales de gaz à effet de serre émises par l'humanité.

Le changement climatique est en effet en cause. Toujours selon la même méthode de comparaison entre une atmosphère avec augmentation des températures et une sans, les chercheurs ont établi que la mousson entre juillet et septembre 2022 dans les régions les plus touchées du Sindh et du Balouchistan a été 50 % plus intense que la moyenne des soixante dernières années, avec 1,1 °C supplémentaire. Le même exercice sur cinq jours donne un volume de pluies supérieur de 75 % dans une atmosphère plus chaude, résultat plus robuste que sur les deux mois où des incertitudes demeurent.

Le sixième rapport du Giec rapporte également les tendances obtenues en revoyant les données de précipitations collectées dans les stations météo, les séries étant plus longues et plus solides dans les régions développées, où ces mesures existent depuis plus longtemps. Sur tous les continents, les pluviomètres révèlent une augmentation significative des jours où le niveau des pluies est supérieur à la moyenne annuelle. *« La probabilité que des pluies excèdent les 50 millimètres dans une journée a augmenté entre 1961 et 2018 dans toutes les régions du monde »*, écrivent les auteurs du rapport. Pour l'Europe, où le réseau météo est ancien et bien documenté, il y a des *« preuves robustes »* que la magnitude et l'intensité des précipitations extrêmes ont fortement augmenté depuis les années 1950. Et la fréquence des fortes pluies sur 1 et 5 jours est elle aussi en hausse. Ces précipitations extrêmes se produisent plus souvent en été et en hiver plutôt qu'au printemps et en automne. Il n'y a que dans le bassin méditerranéen où aucune tendance n'émerge *(lire ci-contre)*.

Il y a un point commun entre Bernd en Allemagne et les moussons catastrophiques d'Asie ou d'Afrique : l'impréparation des populations impactées. L'ONU fait remarquer que la plupart des morts sont des personnes âgées qui n'ont pas été mises à l'abri à temps. La destruction de centaines de kilomètres de routes en Allemagne ou au Pakistan illustre que les infrastructures partout dans le monde ne sont pas conçues pour résister à ces événements bien plus destructeurs que des inondations lentes qu'on arrive à stopper avec des digues. Bernd a démontré que même un des États les plus riches de la planète n'était pas prêt à affronter un climat toujours plus chaotique. ■

Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

TENDANCE

Le contre-exemple italien

C'est la dernière catastrophe en date. Les 2, 10 et 16 mai, la région italienne d'Émilie-Romagne a connu trois épisodes de pluies intenses tombant sur des sols compactés par deux années de sécheresse qui n'ont pu absorber l'eau. 50 000 personnes ont dû être évacuées. Pour définir l'influence du changement climatique, les chercheurs ont pu bénéficier des mesures des 60 stations météo de la région en activité depuis les années 1960. L'épisode de 2023 est le plus humide enregistré par ce réseau et le temps de retour d'un tel événement est estimé à 200 ans. Mais en étudiant la tendance sur ces deux siècles, les chercheurs n'ont pas pu démontrer que les pluies de 2023 ont été plus abondantes que celles du début du XVIIIe siècle. Aucun des 19 modèles climatiques n'a donné une modification significative de la fréquence et de l'intensité d'un tel événement. *« Cela suggère que, contrairement à la plupart des régions du monde, il n'y a pas d'augmentation détectable de pluies intenses en Émilie-Romagne au printemps »*, concluent les chercheurs peu surpris par le résultat. Ces travaux confirment en effet des études plus anciennes démontrant que depuis le début de l'ère industrielle, le nombre de dépressions en Méditerranée centrale a diminué, provoquant une réduction des pluies intenses dans la région.

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

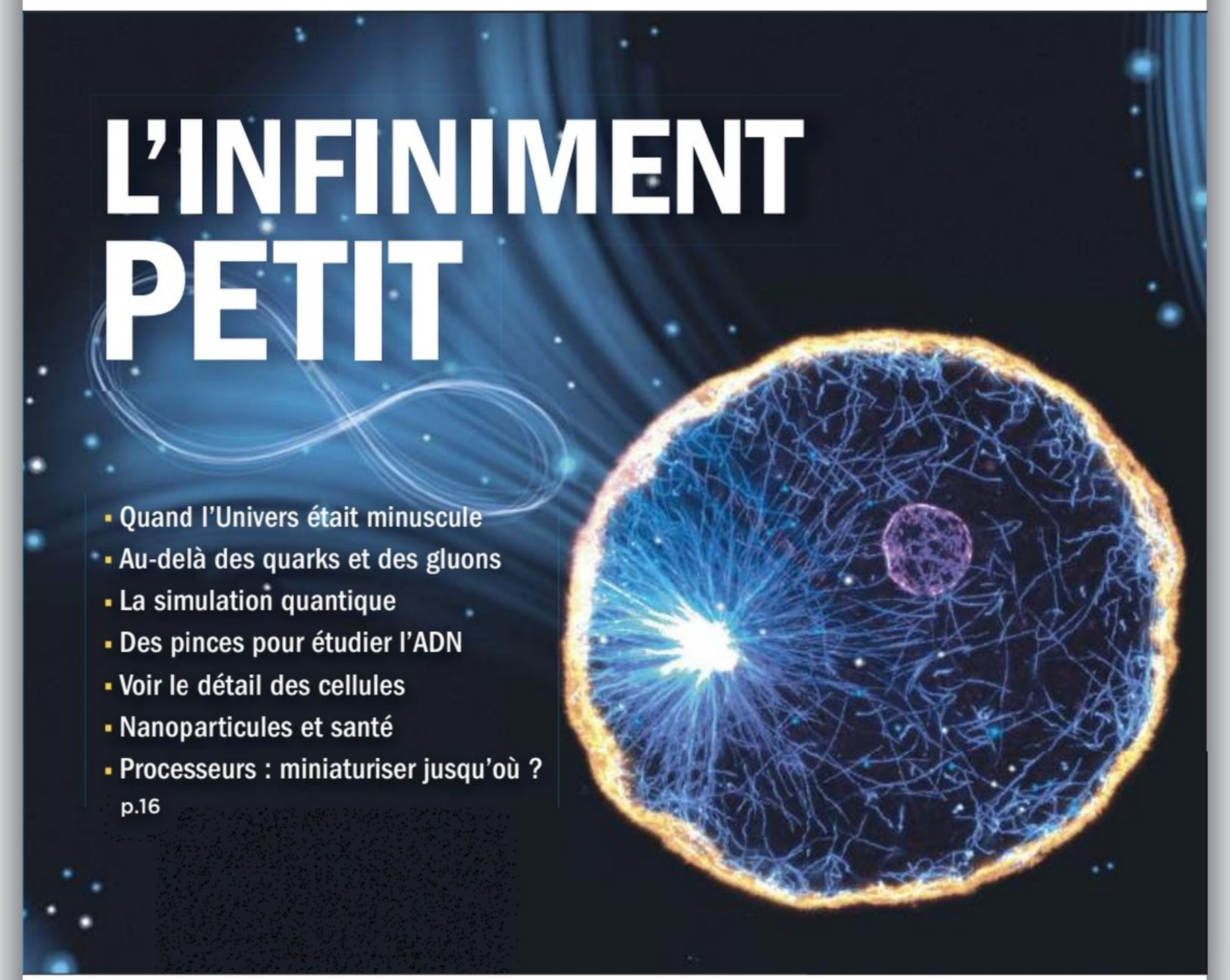
La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Alain Fischer
Président de l'Académie des sciences
LA CULTURE SCIENTIFIQUE AU CENTRE DU DÉBAT
p.6

Rosa Cossart
Neuroscientifique, Marseille
LES INTERNEURONES, NOUVEAUX CHEFS D'ORCHESTRE DU CERVEAU
p.92

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE - JUILLET / SEPTEMBRE 2023 - 9€90



Astrophysique
LE CIEL INFRAROUGE AVEC LE JAMES-WEBB
p.78

Fertilité
LA BIOPHYSIQUE DES OVOCYTES
p.122

Environnement
SAUVER LA NUIT
p.100

Archéologie
LES MÉGALITHES D'ÉTHIOPIE
p.114

Science et fiction
L'IA, POUR LE MEILLEUR ET POUR LE PIRE
p.140

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

GETTY IMAGES

Sur les 157 composés de pesticides et leurs métabolites recherchés dans les eaux brutes et traitées au cours de la campagne d'analyses 2020-2021 du Laboratoire d'hydrologie de Nancy, 89 ont été quantifiés en eaux brutes et 77 en eaux traitées.

Eau potable : la menace des polluants

Elle est dite sûre, ultra-contrôlée. En France, l'eau du robinet est jugée saine pour l'alimentation quotidienne. Pourtant, de récentes études sèment le doute. Et si de dangereux polluants n'avaient jamais été identifiés simplement faute de les avoir cherchés ? Enquête aux conclusions dérangeantes.

L'eau du robinet pourra-t-elle demeurer potable ? En mars, le dernier rapport publié par le laboratoire d'hydrologie de Nancy (LHN), un organisme de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation) a dévoilé de nouvelles pollutions dans l'eau : des résidus de pesticides, d'explosifs et d'un solvant, qui n'étaient pas mesurés jusque-là ! Pourtant, en France, l'eau du robinet est le produit de consommation le plus contrôlé : environ 800 molécules y sont recherchées, et leurs taux de concentration surveillés afin qu'ils ne dépassent pas les limites imposées par le code de la santé publique. *« Quelque 320 000 prélèvements et plus de 18 millions d'analyses sont réalisés annuellement, depuis les eaux brutes jusqu'aux eaux distribuées au robinet du consommateur,* explique Laurence Cate*, membre de la direction de l'eau au ministère de la Santé. *De nouvelles molécules sont régulièrement ajoutées au contrôle sanitaire, comme les perturbateurs endocriniens.* » La liste des substances à surveiller est révisée tous les six ans. Mais avec *« environ 33 000 points de captage d'eau, 16 000 stations de traitement et 900 000 km de réseau de distribution, des pollutions transitoires passent nécessairement sous les radars, ainsi que toutes les pollutions que l'on ne connaît pas encore »*, analyse Christophe Rosin*, chef de l'unité chimie des eaux au LHN.

L'eau du robinet est prélevée dans les lacs, les rivières, les nappes souterraines. Soit des ressources dont *« les contaminations peuvent se faire par les sols, qui les enrichissent par exemple en arsenic, naturellement présent dans l'environnement,* détaille Éléonore Ney, responsable de l'unité d'évaluation des risques liés ▶

à l'eau à l'Anses. *Mais également par des apports humains tels les engrais ou les pesticides. D'où la nécessité de traiter l'eau pour la rendre potable.* » Depuis les années 1930, le nombre de substances chimiques produites a été multiplié par 400. Et les eaux étant le réceptacle final de ce que l'on consomme à travers les ruissellements, infiltrations et autres lessivages, on y retrouve aussi « *des médicaments, des substances liées au traitement de l'eau potable ou aux réseaux de distribution d'eau, tel le chlorure de vinyle monomère* », énumère Christophe Rosin. Ce composé synthétique principalement utilisé pour la fabrication du PVC (polychlorure de vinyle) est largement présent dans les canalisations. C'est un agent cancérogène certain pour l'humain, selon le Centre international de recherche sur le cancer, mais cela n'a été prouvé qu'à des doses importantes en milieu professionnel, et non « *dans le cas d'une consommation quotidienne d'eau du robinet* », indique le ministère de la Santé. En l'état actuel des connaissances.

Le dernier rapport du LHN résulte de l'une de ses missions qui consiste à identifier de nouvelles pollutions de l'eau potable, à l'aide de campagnes périodiques de prélèvements de molécules nouvellement synthétisées ou utilisées en grandes quantités. La campagne 2020-2021 du LHN s'est ainsi intéressée à trois classes de composés : des pesticides et leurs produits de dégradation (appelés métabolites), des résidus d'explosifs et de 1,4-dioxane, un solvant très utilisé dans la seconde partie du XX^e^ siècle et cancérogène avéré sur le rat. Une opération d'échantillonnage d'eaux brutes et traitées a été réalisée sur 300 sites répartis sur le territoire français, qui alimentent environ 20 % de la population. Sur les 157 composés de pesticides et leurs métabolites recherchés, 89 ont été quantifiés en eaux brutes et 77 en eaux traitées. Plus inquiétant : « *la totalité des eaux brutes et traitées prélevées en Bretagne et dans les Hauts-de-France contiennent au moins un pesticide ou métabolite,* relève le rapport. *Ces deux régions présentent également des fréquences de non-conformité élevées en eaux traitées : 92 % en Bretagne et 76 % dans les Hauts-de-France. […] Les concentrations les plus élevées en somme de pesticides et métabolites dans l'eau traitée ont été observées dans les régions Hauts-de-France et Bourgogne-Franche-Comté.* » Mais c'est surtout la présence quasi généralisée dans les eaux de métabolites du chlorothalonil, un pesticide utilisé pendant cinquante ans et interdit en Europe depuis 2019, qui inquiète. Des chercheurs suisses avaient préalablement détecté ces contaminants sur tout le territoire helvète, ce qui a éveillé les soupçons du LHN. Or ce pesticide — considéré comme cancérogène probable par les autorités européennes — et ses sous-produits sont détectés à des taux bien supérieurs aux normes de qualité…

CESE

« Les pollutions aux pesticides dans les eaux souterraines ont considérablement augmenté entre 2010 et 2018 »

Marie-Laure Métayer, adjointe au directeur de la direction de l'eau du ministère de la Transition écologique

Les industriels produisent toujours plus de molécules

« *Nous assistons à une généralisation de la présence de pesticides dans les eaux souterraines,* souligne Marie-Laure Métayer*, adjointe au directeur de la direction de l'eau du ministère de la Transition écologique. *Ces pollutions ont augmenté considérablement entre 2010 et 2018. Et des produits comme l'atrazine, interdit depuis vingt ans, sont toujours présents dans l'environnement. Une étude a ainsi montré que sur 100 enfants testés, neuf présentaient des traces de ce pesticide dans leurs cheveux.* » Selon cet organisme gouvernemental, les nitrates, composant utilisé dans les engrais, sont le deuxième sujet de dépassement des limites de qualité en France. L'interdiction de certains composés jugés dangereux est-elle la solution ? « *Il est facile ensuite pour les industriels de mettre sur le marché d'autres produits de la même famille, avec simplement des chaînes carbonées différentes. Le bisphénol A a été interdit, mais d'autres bisphénols ont été développés, moins toxiques peut-être…* » Mais pas forcément anodins.

Le véritable problème est que l'industrie produit des molécules, plus ou moins

P. TURPIN/ PHOTONONSTOP

DISPOSITIF

Les limites des carafes filtrantes

Pour éliminer le goût de chlore ou le calcaire de l'eau, certains foyers utilisent des carafes filtrantes. Mais selon l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation), si ces systèmes diminuent efficacement chlore, cuivre et plomb, ils peuvent aussi favoriser la multiplication de micro-organismes, diminuer le pH de l'eau — autorisant alors la dissolution de métaux composant bouilloires ou casseroles —, libérer de l'argent et autres substances présentes dans les filtres. Il est recommandé de conserver l'eau filtrée au réfrigérateur et de la consommer sous 24 h, de nettoyer la carafe et de remplacer la cartouche selon les règles du fabricant.

TRAITEMENTS

Comment l'eau est rendue potable

L'eau prélevée dans la nature est rendue potable après divers traitements. La première étape consiste à éliminer gros et petits débris à l'aide de sas grillagés, de tamis et râteaux mobiles. La deuxième utilise des coagulants pour agréger les particules suspendues en grumeaux, qui tombent au fond de bassins de décantation. L'eau clarifiée est alors filtrée par des couches de sable, du charbon actif ou des membranes qui retiennent les plus petites particules. Virus, bactéries, micro-organismes — mais aussi ammoniaque, fer ou manganèse — sont ensuite éliminés par traitements chimiques (ozone, chlore, etc.) ou rayons ultraviolets. Ces traitements ne suffisent néanmoins pas à éliminer toute trace de pesticides, nitrates et autres polluants qui se multiplient dans l'environnement. Aussi, certains édiles se tournent aujourd'hui vers la technique dite d'osmose inverse basse pression, à l'instar de la mairie de Pussay (Essonne), qui vient d'inaugurer la première station du genre en Île-de-France. Ce procédé recourt à des membranes de mailles nanométriques, enroulées en spirale dans des tubes dans lesquels l'eau est injectée à haute pression. Les partisans de ce traitement vantent l'eau « ultra-pure » ainsi obtenue. Mais pour les défenseurs de l'environnement tel Pascal Grandjeat, de l'association Eau publique Orge-Essonne, *« cette technique, qui consomme plus d'eau, plus d'électricité et coûte plus cher, est une fuite en avant technologique qui appartient au siècle dernier. La prévention ou la protection des zones de captage réalisée grâce aux changements de pratiques des agriculteurs a pourtant montré son efficacité ailleurs.* »

GILLES ROLLE/REA

Le système dit d'osmose inverse permet une filtration plus fine (ici dans l'usine Sedif à Méry-sur-Oise, Val-d'Oise). Il est cependant plus cher et coûteux en eau et électricité.

toxiques, à un rythme bien plus élevé que ce que peuvent analyser les organismes chargés de leur détection et de l'évaluation de leur toxicité. Ainsi, la production de nouveaux composés pourrait tripler d'ici à 2050, d'après une étude de janvier 2022. Comment établir des normes dans ces conditions ? *« Le nombre de molécules commercialisées en Europe est d'environ 100 000,* explique Christophe Rosin. *Mais on a détecté à ce jour 350 000 substances dans l'environnement, et il y en a potentiellement des millions présentes, que nous ne mesurons pas… Nous n'avons pas de connaissances exhaustives des métabolites de chaque pesticide, souvent plus stables que le pesticide initial. Sans parler des polluants dits éternels qui, avec une liaison carbone-fluor très solide, sont difficilement biodégradables… On intervient* a posteriori, *mais il faudrait agir à la source pour conserver l'eau potable.* »

Des résidus d'explosifs résultant de la guerre de 14-18

L'histoire récente aurait pourtant pu susciter plus de prudence. L'étude du LHN a en effet relevé, dans certaines régions, la présence dans l'eau de 18 résidus d'explosifs, résultant pour l'essentiel des deux guerres mondiales. Et plus particulièrement de la période 1914-1918, au cours de laquelle *« environ 1 milliard de munitions tirées par les belligérants et environ 500 000 tonnes de composés nitroaromatiques [ont été] fabriqués en Allemagne »*, engendrant une pollution environnementale d'une grande diversité chimique. C'était il y a un siècle… *« La pollution chimique existe depuis longtemps et est devenue planétaire, avec des mélanges complexes et une exposition chronique des populations,* alerte Yves Lévi*, professeur émérite de santé publique à l'université de Paris-Saclay. *C'est un problème d'une dimension colossale, avec des incidences sur la reproduction, des cancers, le diabète et même sur notre immunité. Il n'y a véritablement qu'une solution : réduire l'exposition aux substances chimiques toxiques et donc réduire leur nombre dans l'environnement. »* ■

Sylvie Rouat @srouat1

* Interventions lors de l'audition publique sur les micropolluants de l'eau organisée le 8 juin par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST).

L'heure de vérité pour la baignade dans la Seine

Un siècle après son interdiction, la baignade sera de nouveau possible dans la Seine à l'occasion des jeux Olympiques de 2024. Il aura fallu près de trente ans d'efforts afin de dépolluer le grand fleuve parisien.

Se baigner dans la Seine est presque une réalité. Dès ce mois d'août, des épreuves tests de natation devraient avoir lieu à Paris au niveau du pont Alexandre-III (7e arrondissement), dans le cadre de la préparation des jeux Olympiques et Paralympiques de 2024. La compétition internationale a en effet prévu d'accueillir trois épreuves dans la Seine : le triathlon, le paratriathlon et les 10 km de la « natation marathon ». Et à partir de 2025, une vingtaine de sites de baignade seront créés dans la métropole du Grand Paris, dont cinq à Paris même. Une nouvelle ère s'ouvre donc, et elle ne doit pas tout aux JO. « *La modernisation du système d'assainissement se poursuit depuis une cinquantaine d'années,* rappelle Vincent Rocher, directeur innovation du Siaap (service public de l'assainissement francilien). *Les Jeux ont servi de catalyseur. Et ils ont fixé une date limite à ce projet très complexe. Le bassin de population est de 10 millions d'usagers et le débit du fleuve assez faible : 300 m³/s en moyenne, quatre fois moins que la Loire à Nantes. L'été, il peut descendre à 80 m³/s. Avec ses 20 à 30 m³ d'eaux traitées rejetées dans la Seine par seconde, cela fait du Siaap son premier affluent.* »

Les critères de qualité d'eau de baignade sont fixés par une réglementation européenne de 2006. « *Ils se fondent sur le taux de bactéries* Escherichia coli *et d'entérocoques intestinaux,* explique Françoise Lucas, chercheuse au laboratoire Eau, environnement et systèmes urbains (université Paris-Est Créteil). *Ces indicateurs bactériens sont des sentinelles : présentes dans l'eau, elles signifient qu'il y a contamination fécale et donc potentiellement toute une panoplie de micro-organismes pathogènes.* »

Des relevés réalisés à l'entrée de Paris, à Ivry-sur-Seine, montrent que la contamination en *E. coli* a augmenté régulièrement depuis 1911 avec un pic dans les années 1980 (500 000 *E. coli* par 100 ml), avant une baisse la décennie suivante. « *Cela correspond à la mise en place d'une réglementation européenne obligeant les communes à mieux traiter leurs eaux usées, ce qui a entraîné une moderni-*

SIAAP

« Les Jeux ont servi de catalyseur au projet très complexe de modernisation du système d'assainissement »

Vincent Rocher, directeur innovation du Siaap (service public de l'assainissement francilien)

APUR-LUXIGON

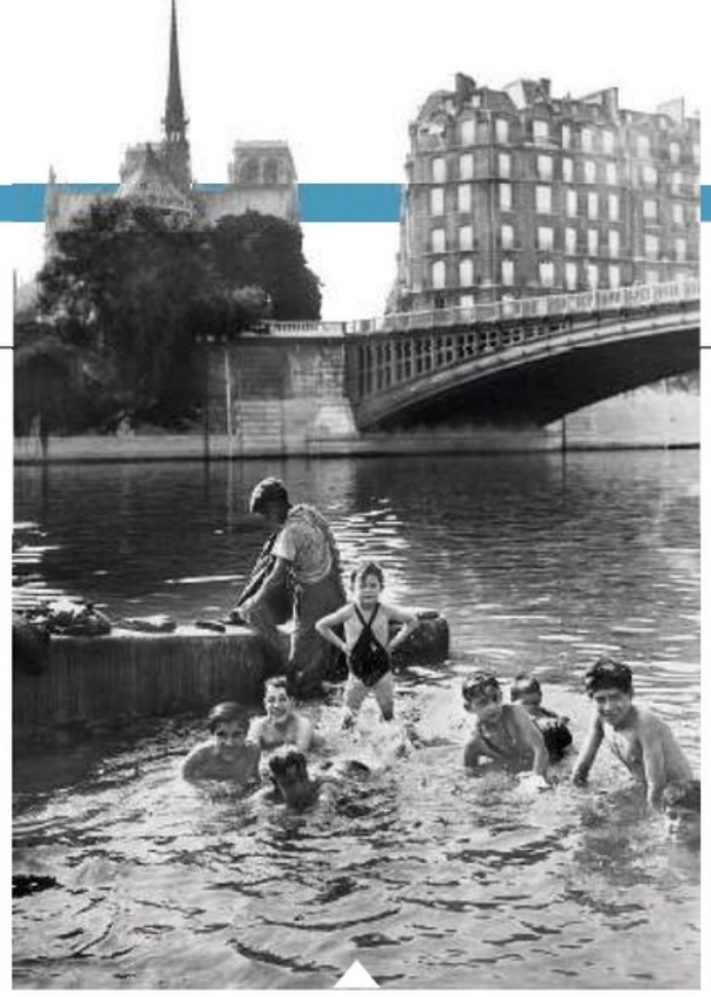
Le site Trocadéro-Champs de Mars (Paris 16e) a été sélectionné pour accueillir trois épreuves des JO en 2024. Et dès l'année suivante, la berge sera équipée de piscines sécurisées à l'abri du courant pour le grand public (vue d'artiste).

sation des stations d'épuration et des réseaux d'assainissement, explique Françoise Lucas. *Le taux d'*E. coli *a été divisé par 100. Cela prouve que l'on peut obtenir des résultats rapidement. Mais depuis les années 2000, nous sommes sur un plateau, avec des moyennes annuelles entre 3000 et 5000* E. coli *par 100 ml.* »

Limiter le ruissellement des eaux pluviales

Ce plateau se situe encore au-dessus des seuils de baignade, fixés à 900 unités d'*E. coli* par 100 ml et 330 unités d'entérocoques intestinaux par 100 ml. Mais certains sites de la Seine et de la Marne sont régulièrement de qualité microbiologique suffisante, par temps sec. En revanche, lors des événements pluvieux, la pluie lessive les sols, entraînant avec elle les déjections d'animaux et autres souillures. Ce ruissellement peut rapidement rendre l'eau impropre à la baignade. Un « coup de collier » à 1,4 milliard d'euros a donc été nécessaire afin de passer nettement sous ces seuils réglementaires avec les JO, en s'attaquant aux diverses sources de contamination de temps sec et de temps de pluie. La plus importante provient du mauvais branchement au tout-à-l'égout d'habitations en amont de la capitale. Les eaux usées sont alors rejetées avec les eaux pluviales, au lieu de partir vers la station d'épuration. « *Le nombre de ces branchements est estimé entre 20 000 et 30 000,* détaille Vincent Rocher. *Les départements mènent un travail de fourmi afin de contacter un à un ces propriétaires dans l'illégalité, et qui ne le savent pas forcément. Mais grâce à l'effet catalyseur des Jeux, nous avons d'ores et déjà remis 5000 logements en conformité.* » De la même façon, les péniches sont désormais priées de se raccorder aux évacuations d'eaux usées disponibles dans tous les ports.

L'autre axe consiste à lutter contre les apports d'eaux non traitées par temps de pluie. En amont de Paris, une usine de dépollution des eaux pluviales est en construction à Champigny-sur-Marne afin d'améliorer la qualité de la Marne. « *Mais contrairement à la banlieue, Paris possède un réseau d'égout unitaire, hérité du XIXe siècle : eaux de pluie et eaux usées circulent dans la même canalisation*, explique Françoise Lucas. *S'il pleut trop, la capacité d'accueil de la station d'épuration peut être dépassée. Un contournement est alors mis en place pour acheminer l'eau vers un déversoir d'orage et la stocker. Mais si le débit est trop important, cela va déborder dans le fleuve.* » Pour éviter cela, des ouvrages de stockage complémentaires sont en construction, dont le plus impression-



KEYSTONE-FRANCE

Baignade en 1937 à Paris, près du pont Saint-Louis. Il est pourtant interdit de se baigner dans la Seine depuis 1923.

nant est le bassin d'Austerlitz, un cylindre pouvant stocker l'équivalent de 20 piscines olympiques, qui se situera sous l'ancien square Marie-Curie (13e arrondissement). « *Ces ouvrages sont indispensables, mais il faut aussi travailler la prévention, en limitant l'imperméabilisation des sols, qui accentue le ruissellement des eaux,* note Vincent Rocher. *Cela signifie favoriser les surfaces végétalisées dans tous les nouveaux projets d'aménagement de l'espace urbain, et éviter le tout béton.* »

Le dernier levier consiste à compléter les filières de traitement des deux usines d'épuration en amont de Paris, Seine Amont et Marne Aval. Aux traitements classiques visant à supprimer les matières organiques — le carbone, mais aussi l'azote et le phosphore dont l'excès déséquilibre le milieu naturel —, le Siaap s'est doté de deux armes supplémentaires pour diminuer d'un facteur mille le nombre de bactéries : des lampes à ultraviolets qui détruisent ces dernières en dégradant leur génome et, depuis fin juin, l'injection d'acide performique à l'usine Seine Valenton. « *C'est l'aboutissement de trois ans de recherches,* souligne Vincent Rocher. *Nous avons vérifié que l'acide disparaît rapidement, qu'il n'engendre pas de sous-produits réactionnels et qu'il est sans effet sur le vivant. Nous en avons conclu que cette molécule est idéale. Avec seulement un gramme, nous traitons un mètre cube d'eau. L'impact financier sur le prix du traitement de l'eau sera quasi nul.* » Ces traitements ne seront utilisés que de juin à septembre.

Une vingtaine de « piscines » sécurisées

Quant aux vélos et trottinettes jetés dans le fleuve par des indélicats, elles sont à l'origine d'une pollution « par éléments de traces métalliques », tout comme celle apportée par les eaux de ruissellement, mais à un niveau moindre. « *L'impact sanitaire des "métaux traces" sera probablement négligeable pour les activités récréatives, comme le montre la littérature scientifique,* souligne Françoise Lucas. *C'est davantage un problème de danger physique pour les enfants et de perception de la qualité de l'eau.* »

Le Siaap l'affirme, tout sera donc prêt pour 2024. Il y a urgence, comme le souligne Françoise Lucas. « *Avec nos étés chauds, nous constatons qu'il y a de plus en plus de baignades sauvages,* notamment dans la Marne. *Cela a déjà provoqué des drames, non pas à cause de la qualité de l'eau, mais parce que ces sites ne sont pas sécurisés.* » La vingtaine de « piscines » sécurisées, à l'abri du courant et de la circulation des bateaux, sont encore à définir auprès de l'ARS (agence régionale de santé) d'Île-de-France. Si tous les efforts mis en place par le Siaap ont effectivement payé, l'agence donnera son autorisation et fixera les modalités de contrôle de la qualité des eaux. « *Les collectivités ont fait part de leur intention de créer des lieux de baignade, mais aucun dossier n'a encore été déposé* », indique-t-on du côté de l'ARS. ■ **Fabrice Nicot**

@fnicot07

LOISIR

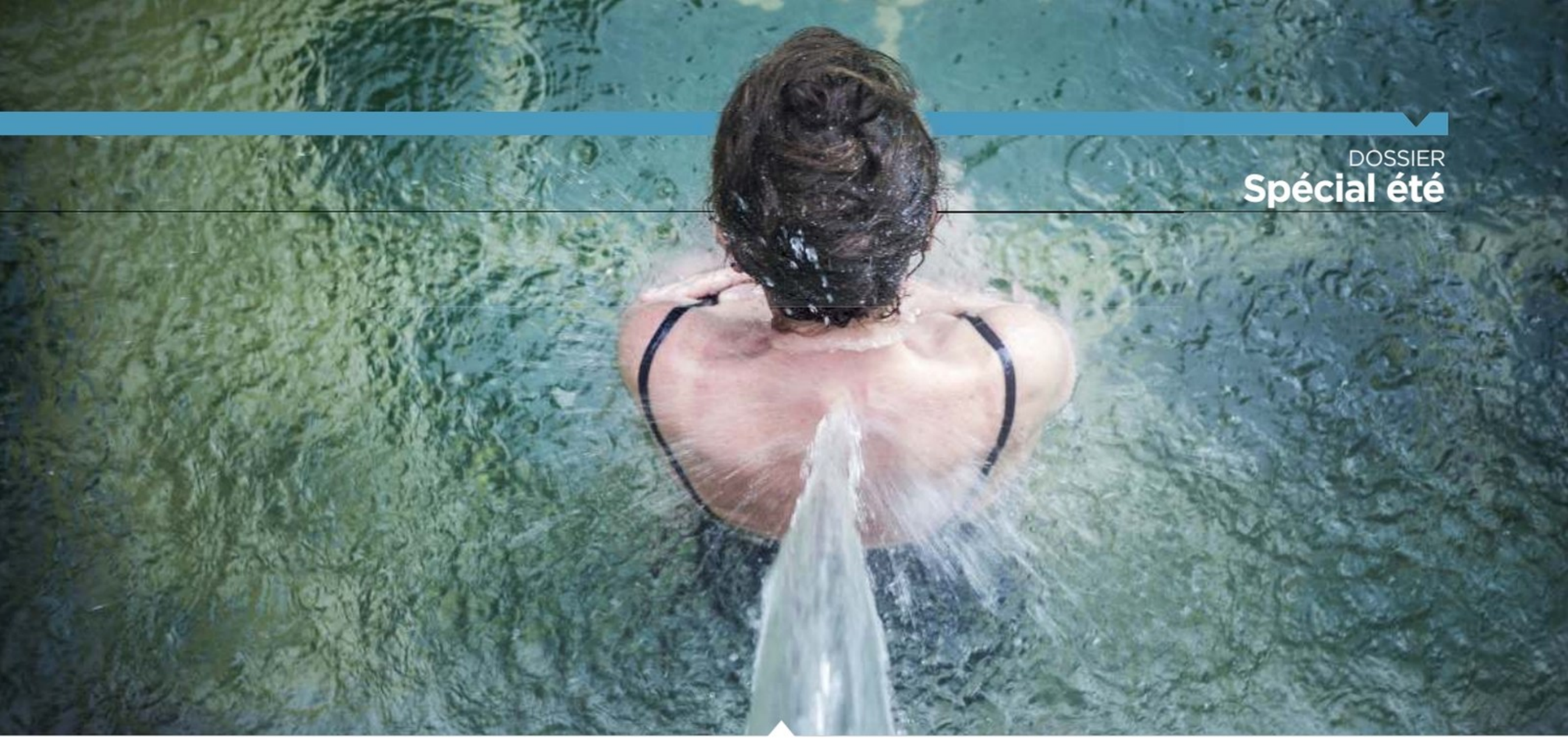
La renaissance de la pêche francilienne

En attendant les nageurs, la Seine rend déjà heureux les pêcheurs, comme l'explique Bernard Breton, président de l'Association régionale de pêche d'Île-de-France. « *Les eaux de la Seine sont d'une excellente qualité, et cela depuis plusieurs années. Il n'y avait plus que six espèces de poissons en 1995, on en compte désormais entre 30 et 35. On a peu de données sur les espèces migratrices (aloses, lamproies, truites, saumons) qui fréquentent le fleuve, mais dont les populations sont très réduites. L'espèce dominante depuis deux ans est le silure qui atteint jusqu'à 2 m et 50 kg. On constate aussi un retour des ablettes, signe de bonne santé du fleuve.* »

La revégétalisation des berges afin d'offrir des lieux de nourrissage et de repos, la mise en place de passes à poissons au niveau des écluses, des stations d'épuration optimisées ont amélioré la qualité de vie des poissons. La consommation de la pêche, interdite dans les années 1990, est autorisée, les teneurs en polychlorobiphényles (PCB) étant sous le seuil maximum… Et c'est bon ? « *Les poissons d'eau douce, c'est à l'appréciation de chacun. Et puis ce sont surtout la préparation et la sauce qui comptent* », conclut sagement Bernard Breton.

PASCAL LAFAY / PINK / SAIF IMAGES

Le nombre d'espèces de poissons dans la Seine a quintuplé depuis 1995.



Si les études montrent que les cures thermales entraînent une amélioration dans le traitement de certaines pathologies, elles l'attribuent plutôt aux effets physiques de l'eau qu'à sa composition chimique.

Les vertus thérapeutiques de l'eau

Thermalisme, thalassothérapie, spa… Les Français raffolent de l'eau pour leur bien-être mais aussi pour leur santé. Pourtant, rien ne prouve qu'elle peut soigner. En revanche, le cocktail bains de mer et activité physique s'avère bénéfique.

Chaque année, pas moins de 600 000 Français vont en cure thermale. Et ils sont 500 000 à s'offrir une thalassothérapie — parfois les mêmes. Le credo de cet imposant bataillon de curistes, ce sont les soins à base d'eau. Qu'il s'agisse de bains, de douches à forte pression, d'hydromassages, de vapeurs, de fines gouttelettes, l'eau est utilisée sous toutes ses formes. Pourtant, thermalisme et thalassothérapie ne doivent pas être confondus. Première différence : l'une utilise de l'eau thermale tandis que la seconde a recours à de l'eau de mer. Autre distinction majeure : la thalassothérapie vise avant tout le bien-être, tandis que les cures thermales constituent un traitement prescrit par un médecin et remboursable à 65 % par la Sécurité sociale. Autant dire que si la thalasso peut s'affranchir des exigences de l'*evidence based medicine* (la médecine fondée sur les preuves), le thermalisme doit tenter de démontrer qu'il est efficace s'il veut contrer les tentatives de déremboursement. Or, comme la communauté scientifique ne se bouscule pas pour produire des essais contrôlés sur le sujet, établissements et villes thermales se sont cotisés en 2004 pour créer l'Association française pour la recherche thermale (Afreth). En près de vingt ans, 20 études ont été menées à terme et publiées dans des revues internationales.

Une littérature encore insuffisante pour convaincre les nombreux médecins sceptiques des bienfaits du thermalisme. « *Nous avons des preuves mais pas dans tous les domaines* », reconnaît le Pr Patrick Carpentier, membre du conseil scientifique de l'Afreth et spécialiste de médecine vasculaire. En effet, ▸

VOISIN/PHANIE

PHYSIOLOGIE

Une douche froide est-elle si bonne ?

Rien de tel pour se réveiller et pour activer la circulation sanguine ! La douche froide au petit matin a-t-elle vraiment des vertus ? En 2016, une étude menée sur 3000 participants montrait que le taux d'absentéisme pour maladie était 29 % plus faible chez ceux qui prenaient une douche froide quotidienne. Les auteurs font l'hypothèse qu'elle renforce le système immunitaire, mais les preuves sont fragiles. Et en été, le rafraîchissement temporaire apporté contraint surtout le corps à lutter pour maintenir les 37 °C. Mieux vaut donc prendre une douche autour de 30 °C.

LUCIEN LUNG / RIVA PRESS

Les activités physiques en contact avec l'eau de mer renforcent les émotions positives et réduisent la réaction au stress.

sur les 12 orientations thérapeutiques* qui ont droit à une prise en charge par l'Assurance-maladie, nous manquons de données. Par exemple, celles attestant des bienfaits des cures en ORL font défaut, malgré les quelque 150 000 personnes qui partent chaque année pour traiter une infection récidivante. *« C'est en rhumatologie que nous disposons le plus d'études, ensuite dans le domaine vasculaire, en dermatologie et psychosomatique »*, précise Patrick Charpentier.

Une baisse de la consommaton d'antalgiques

L'un des plus larges essais contrôlés randomisés en médecine thermale a été publié en 2009 dans les *Annals of the Rheumatic Diseases*. Plus de la moitié des curistes souffrant d'une arthrose du genou ont vu une amélioration de leur douleur et de leurs capacités fonctionnelles, contre 36 % chez ceux qui avaient fait des exercices à domicile. Et l'effet était perceptible six mois après la cure. Passer dix-huit jours dans un établissement thermal avec quatre soins par jour — la durée réglementaire d'une cure — permet aussi parfois de faire baisser la consommation d'antalgiques, comme l'a révélé une méta-analyse regroupant 27 essais cliniques randomisés, publiée en 2015 dans *Douleur et Analgésie*, incluant des patients souffrant essentiellement d'arthrose, de polyarthrite rhumatoïde ou de lombalgie. Cependant, *« je n'ai jamais vu de preuves que ces bénéfices étaient dus aux propriétés chimiques de l'eau,* tempère le Pr Francis Berenbaum, chef du service de rhumatologie à l'hôpital Saint-Antoine (APHP) et chercheur à l'Inserm. *C'est le mouvement qui est thérapeutique en rhumatologie. Être en quasi-apesanteur dans l'eau chaude a un effet myorelaxant (qui détend les muscles) qui facilite les exercices. De plus, lors d'une cure, les patients sont captifs, ce qui permet de faire de l'éducation thérapeutique et éventuellement d'ajouter un programme diététique. Car l'arthrose est aussi due au surpoids. »*

Du côté de l'Afreth, on ne conteste pas cette vision des choses. *« En rhumatologie comme en phlébologie, les effets physiques de l'eau sont certainement plus importants que sa composition chimique,* reconnaît Patrick Carpentier. *Mais le traitement est multifactoriel, et c'est ce qui explique l'importance des effets observés. »* Dans l'insuffisance veineuse chronique, trois études françaises, publiées dans des revues internationales, mettent en évidence une amélioration de la qualité et de la douleur après une cure. Des résultats subjectifs — puisqu'ils reposent sur du déclaratif — qui ont conduit les auteurs à évaluer aussi la couleur de la peau, marqueur de ces problèmes veineux. Et l'amélioration était significative pendant au moins un an. *« En revanche, nous n'avons observé aucune réduction du nombre d'ulcères sur cette période »*, regrette Patrick Carpentier.

En dermatologie, le contact direct de la peau avec l'eau laisse présager des effets plus flagrants. Mais les études ne sont pas légion. Les résultats de l'essai Psothermes, publiés en 2022, *« mettent tout de même en évidence une amélioration très nette de la qualité de vie et des symptômes de prurit dans le psoriasis, qui persiste un an »*, témoigne le Dr Jérémy Lupu, dermatologue. Mais, encore une

NEUROLOGIE

Un « choc froid » pour éloigner les démences

Se plonger dans une eau glacée, l'idée en refroidit plus d'un. Cette activité donne pourtant un vrai coup de fouet au cerveau. Des chercheurs ont en effet constaté que nombre de nageurs en eau froide présentaient des niveaux élevés d'une protéine dite de choc froid, appelée RBM3. Celle-ci pourrait même protéger contre les démences, selon une étude menée en 2015 sur des souris : afin d'augmenter les niveaux de cette protéine dans le cerveau, les scientifiques ont pratiqué une forme de thérapie génique sur des souris infectées par des prions. *« Nous avons montré qu'une seule injection suffisait à leur fournir une protection durable, empêchant ainsi la progression inévitable de la neurodégénérescence »*, explique Giovanna Mallucci, de l'Institut britannique de recherche sur la démence de l'université de Cambridge.

fois, le mécanisme d'action reste flou. Les oligo-éléments présents dans l'eau ont un effet anti-inflammatoire, mais « *c'est la cure dans son ensemble et la parenthèse qu'elle représente qui ont un retentissement psychosocial* », estime ce dernier.

Une efficacité supérieure aux antidépresseurs

Les bénéfices psychologiques ont aussi été mesurés. Dans le trouble anxieux, un essai coordonné par l'Inserm et les thermes de Saujon (Charente-Maritime) a par exemple montré qu'une cure thermale portait ses fruits, surpassant même l'antidépresseur de référence. Est-ce un effet des bains bouillonnants ? La question n'est pas tranchée. Cette incertitude n'empêche pas de proposer la cure à de nouveaux publics. Depuis ce printemps, des femmes en rémission de cancer du sein peuvent ainsi en bénéficier. L'expérimentation menée dans 18 établissements a reçu l'agrément de l'Assurance-maladie après la publication d'un essai multicentrique, prospectif et randomisé. Le séjour thermal de 13 jours avait plus d'impact en matière d'anxiété, de qualité de sommeil et de qualité de vie qu'un suivi hygiéno-diététique simple conduit à domicile… Et les effets étaient mesurables cinq ans après le séjour.

Quelques scientifiques ont bien cherché à trier ce qui relève exclusivement de l'eau. Des chercheurs polonais viennent ainsi de publier un essai sur les bains d'eau thermale sulfurée pour soulager l'arthrose. La revue — *Scientific Reports* — est prestigieuse, mais « *la méthodologie est très mauvaise* », lance Francis Berenbaum. La fluidité du sang est effectivement améliorée après les bains, mais « *ils n'ont pas comparé bains sulfurés* versus *bains non sulfurés. Aucune conclusion ne peut donc être tirée de cette étude.* » Des comparaisons eau thermale/eau du robinet et boues thermales/boues neutres n'apportent pas plus d'éclaircissements. Dans la revue systématique publiée en 2017, les auteurs estimaient que « *des études bien conçues portant sur une population de patients plus importante sont nécessaires pour établir le rôle des minéraux et d'autres composés chimiques dans les cures thermales.* » Pour percer ce mystère, l'Afreth a lancé un appel d'offres et un travail universitaire va commencer afin « *d'identifier les mécanismes d'action mis en jeu par la cure thermale, le rôle spécifique de l'élément thermo-minéral* ».

La facture annuelle de 270 millions d'euros par an pour l'Assurance-maladie doit bien être justifiée. D'autant que la pertinence de la prise en charge des cures a été remise en cause à plusieurs reprises. En 2022, un amendement au projet de loi de financement de la Sécurité sociale, prévoyant de conditionner leur remboursement à des preuves scientifiques d'efficacité, avait été adopté par la commission des affaires sociales de ▸

JOSEP LLORET ROMAÑACH

VERBATIM

JOSEP LLORET ROMAÑACH

DIRECTEUR DE LA CHAIRE « OCÉANS ET SANTÉ HUMAINE » À L'UNIVERSITÉ DE GÉRONE (ESPAGNE)

« La mer est plus apaisante que la campagne »

“La thérapie par la nature « bleue », ça existe. Cela va de la simple vue de la mer à une marche le long d'un espace bleu, jusqu'à une véritable interaction, comme avec la natation par exemple. Des recherches menées par l'université d'Exeter (Royaume-Uni) ont montré que des balades quotidiennes en bord de mer sont associées à des niveaux élevés d'émotions positives qui réduisent le stress. Et cet effet est plus puissant que celui provoqué par des promenades dans des parcs ou même en pleine campagne. Les effets positifs sur la santé et le bien-être des environnements marins et côtiers sont dus à l'exercice physique et l'exposition à la vitamine D. En fait, la respiration profonde et la natation en eau froide réduisent notre réaction au stress, par l'intermédiaire de l'amygdale cérébrale et du système nerveux autonome, et peuvent aider à résoudre des problèmes tels que l'anxiété et la dépression, ou certaines affections inflammatoires. Avec mon collègue Angel Izquierdo, oncologue, nous avons réalisé une étude auprès de personnes souffrant de cancer. Pendant deux ans, elles ont pratiqué la marche en bord de mer, la natation et la plongée en apnée. Nous avons observé que plus l'activité favorisait un contact avec la mer, plus les scores de bien-être émotionnel augmentaient. La pratique de la plongée en apnée apportait plus de bénéfices que la baignade et celle-ci plus de bénéfices que la marche en bord de mer. Ces résultats nous incitent à penser que les médecins devraient envisager de prescrire et de promouvoir la santé bleue.”

Propos recueillis par C. C.

l'Assemblée nationale. Le gouvernement ne l'a finalement pas retenu… Or, comme l'a indiqué la présidente du collège de la Haute Autorité de santé (HAS), en réponse à une question de la Cour des comptes en 2019, si la HAS était chargée d'évaluer le service médical rendu par les cures thermales, *« en l'absence de données scientifiques montrant l'intérêt de ces soins thermaux, il y aurait un risque de "déremboursement massif" »*.

Un sommeil amélioré avec la thalassothérapie

Quant aux effets de l'eau de mer sur notre santé, ils ne sont pas plus démontrés. Et pour cause, le secteur de la thalassothérapie « vend » du bien-être et pas de la thérapie. Mais les mêmes causes produisant les mêmes effets, se mettre au vert lors d'une cure — en établissement thermal ou en centre de thalassothérapie — peut aider à lutter contre le stress, et ses corollaires que sont les insomnies, la fatigue, les contractions musculaires… Une équipe de l'Institut de recherche biomédicale des armées et de l'université Paris-Descartes a bien mené une étude aux Thermes marins de Saint-Malo, dont les résultats ont été présentés au congrès du sommeil de 2017. Après quatre jours de soins incluant massages, enveloppement d'algues et jets sous-marins, les 11 participants avaient gagné 23 minutes de sommeil réparateur par nuit. Les échelles de fatigue, de stress, de perturbation de l'humeur enregistraient elles aussi des baisses significatives. Mais, encore une fois, impossible d'attribuer ces effets uniquement à l'eau. Malgré l'absence de preuves, le marché de la thalassothérapie est en pleine forme. ■ **Cécile Coumau**

* Affections des muqueuses bucco-linguales, digestives et métaboliques, psychosomatiques, urinaires, dermatologie, gynécologie, maladies cardio-artérielles, neurologie, phlébologie, rhumatologie, troubles du développement chez l'enfant, voies respiratoires.

Un objet de fantasmes et d'arnaques

La molécule H_2O drague dans son sillage nombre de théories pseudoscientifiques. Passage en revue des plus courantes d'entre elles.

La fascination naturelle qu'exerce l'eau a nourri un riche symbolisme au cours des âges. Et le développement de la science contemporaine ne semble pas avoir tari le besoin de lui attribuer plus de bienfaits qu'elle n'en a déjà. Voici le vrai du faux des théories pseudoscientifiques sur l'eau.

1 L'eau a une excellente mémoire

FAUX C'est l'une des plus célèbres controverses scientifiques contemporaines. En juin 1988, une équipe internationale emmenée par le Dr Jacques Benveniste, immunologue reconnu à l'Inserm, publie dans la prestigieuse revue *Nature* une étude au retentissement mondial immédiat. Elle suggère que l'eau entrée en contact avec certaines substances conserve une empreinte chimique des propriétés de ces substances, alors même qu'elles n'y sont plus présentes… Autrement dit, l'eau garderait en mémoire la trace des molécules qu'elle rencontre, même après en avoir été complètement débarrassée. Alors que les tentatives de reproduction des expériences de Jacques Benveniste ont échoué quelques semaines seulement après la fameuse publication, et que cette mémoire de l'eau a été invalidée par toutes les disciplines scientifiques concernées depuis — chimie, physique, biologie —, la véracité de l'hypothèse est encore affirmée aujourd'hui. En particulier pour accréditer les effets — jamais démontrés — des préparations homéopathiques sur la santé, comme les granules. Ces petites billes de sucre sont en effet imprégnées d'environ 0,01 millilitre d'une préparation à l'eau diluée des centaines de fois, au point de ne plus présenter aucune trace de la substance d'origine censée aider l'organisme à se défendre — viscères de canard, virus ou autre glande anale de putois.

En réalité, la mémoire de l'eau est une hypothèse taillée sur mesure pour offrir un rationnel scientifique à l'homéopathie : même si la fameuse « dose homéopathique » s'avère inexistante du fait des dilutions successives, l'eau qui a imbibé le granule garderait en mémoire les propriétés chimiques de la substance thérapeutique présumée. La validation expérimentale était trop belle ! Et pour cause, c'est dans le cadre de travaux sur les hautes dilutions commencés en 1980 et financés par l'industrie homéopathique, les laboratoires Boiron notam-

YUANYUAN YAN / GETTY IMAGES

ment, que Jacques Benveniste aboutit à cette hypothèse, qui reste indémontrable à ce jour. « *C'est une idée qui ne veut pas mourir, essentiellement parce que les gens ont envie d'y croire,* explique Damien Laage, directeur de recherche CNRS au département de chimie de l'École normale supérieure de Paris. *Pourtant, on sait aujourd'hui qu'il n'y a pas de place dans la physique et la chimie de l'eau pour un tel concept.* »

2 Elle attire le sourcier et sa baguette

VRAI **FAUX** Et si la sourcellerie revenait à la mode ? L'eau devenant une denrée rare, certains sont désormais tentés d'en rechercher dans leur terrain. Mais peut-on se fier aux sourciers pour savoir où creuser et à quelle profondeur ? Plusieurs expériences ont été menées dans les années 1980 pour tester les capacités des sourciers : à Sydney en Australie, avec 16 participants ; puis en Allemagne, à Munich, entre 1986 et 1988, où 843 essais de détection d'eau passant dans un tuyau sous le sol ont été réalisés par 43 sourciers, eux-mêmes sélectionnés parmi 500 candidats. Les résultats ne montraient pas de différence statistique de succès avec une recherche effectuée au hasard.

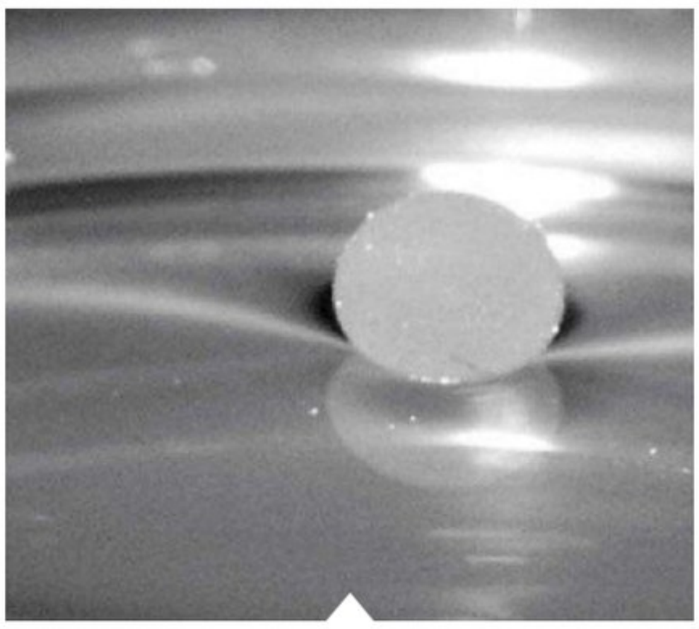
En conditions réelles, le sourcier éclairé bénéficie toutefois de deux avantages pour améliorer ce score aléatoire. D'abord, il y a souvent de l'eau dans les sols — reste à savoir à quelle profondeur. Ensuite, le sourcier peut suivre les indices d'une présence de la ressource à tel ou tel endroit, qu'il s'agisse d'une végétation plus abondante, d'un détail topographique ou d'une connaissance empirique des sources et rivières d'une zone. Mais la baguette du sourcier, elle, ne réagit pas à la présence d'eau. Pour expliquer son mouvement, lorsqu'il n'est pas simulé, il ne reste que l'effet idéomoteur, des mouvements musculaires inconscients. Pour être sûr de creuser au bon endroit et savoir à quelle profondeur avant de commencer, l'exploration hydrologique par des entreprises de forages géotechniques est ainsi plus sûre, mais peut-être plus coûteuse.

3 Elle peut être rendue plus « mouillante »

FAUX Le concept a beau n'avoir pas le moindre fondement scientifique, il fait florès : dynamiser son eau permettrait de rendre à celle-ci toutes ses propriétés perdues : son énergie naturelle et sa structure originelle. L'eau serait ainsi plus hydratante pour la peau, nos cellules et les plantes, moins oxydante et plus énergétique… parfois même « *plus mouillante* » ! C'est ce que promet la société LM Innovation qui commercialise un dispositif à brancher sur les arrivées d'eau pour restructurer celle-ci avant son utilisation. Objectif : « *retrouver une eau comme il y a deux cents ans* ». Les épidémies récurrentes de choléra et de fièvre typhoïde du XIXe siècle en moins, on espère. Que l'eau soit dite « dynamisée » ou, plus récemment, « structurée », le principe, très ésotérique, est toujours le même : il s'agit soit de faire tournoyer le liquide en vortex de façon à « *imiter le mouvement naturel de l'eau dans la nature* », soit d'utiliser le magnétisme terrestre pour lui ôter toute pollution électrique et électromagnétique… De la simple « tasse vortex magnétique » à 39,90 euros au pack Biodynamizer appliquant « *21 principes de dynamisation* » sur l'arrivée d'eau de la maison pour 3500 euros, en passant par le vitaliseur-dynamiseur de cuisine (2 litres) à 669 euros, le marché est varié. Depuis peu, la société Biodynamizer commercialise même une bière brassée à l'eau dynamisée.

Outre les particuliers, le secteur de l'agriculture en biodynamie est une cible de choix pour ces procédés. Cette agricul-

ture repose sur un courant ésotérique, l'anthroposophie, fondé au début du XXe siècle par l'Allemand Rudolf Steiner, et se caractérise par sa dimension occulte faisant jouer des *« forces cosmiques et terrestres »*. La dynamisation de préparations à l'eau par vortex est ainsi l'une des pratiques phares de cette agriculture. La société française LM Innovation promet ainsi que son eau structurée réduit de 30 % les besoins d'arrosage, de 40 % la dose de traitement à appliquer et permet aux animaux de ferme de mieux assimiler les aliments… Autant d'allégations dont on ne trouve pas la moindre source scientifique, malgré un discours pseudoscientifique parfois sophistiqué. La société explique même ainsi avoir été contactée par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Vérification faite : le CEA nous a précisé avoir bien contacté l'entreprise mais uniquement dans le but de faire un recensement des procédés sur le marché, sans leur accorder de valeur scientifique. *« Les commerciaux à l'origine de ces dispositifs mettent en avant un réarrangement moléculaire de l'eau,* explique Damien Laage, *alors même qu'on sait aujourd'hui de façon très précise que les liaisons hydrogène de l'eau se réarrangent en permanence, empêchant toute structure particulière de se figer plus d'une picoseconde »*, soit un millième de milliardième de seconde. *« Mais ces théories un peu loufoques sont tenaces, car les gens ont envie d'y croire »*, ajoute le chimiste. De fait, les études et expériences menées sur l'agriculture biodynamique n'ont jamais permis de lui trouver plus d'intérêt qu'une agriculture biologique classique excluant le folklore ésotérique de l'anthroposophie.



2007 AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.

L'eau sèche en poudre pourrait être utilisée comme piège à CO_2 ou pour transporter du gaz naturel.

4 L'eau peut être réduite en poudre

VRAI Cela ressemble à un mauvais gag, et pourtant ! Oui, il est possible de faire de l'eau en poudre. Il ne s'agit pas, bien sûr, de la lyophiliser en l'asséchant. Mais d'enrober des gouttes d'eau de nanoparticules hydrophobes de façon à les transformer en grains d'eau secs. Si le concept a été découvert au tournant des années 1970, c'est un duo de chercheurs français, Pascale Aussilous et David Quéré, qui le remet au goût du jour en 2001 dans la revue *Nature*. Cette fois, l'eau est « non mouillante », c'est l'eau sèche. L'objectif est de faciliter le transport de petites quantités de liquide sur un solide, pour des dispositifs de microfluidiques par exemple. Pour réduire les forces s'exerçant entre le liquide et le solide, les chercheurs proposent ainsi *« une alternative simple, qui consiste à encapsuler une gouttelette de liquide aqueux avec une poudre hydrophobe »*. De cette façon, l'eau ne mouille pas les surfaces qu'elle rencontre. Pour obtenir cette poudre fine, il suffit de disperser des nanoparticules de silice hydrophobe dans l'eau et d'agiter celle-ci à 19 000 tours/minute pendant 90 secondes. Depuis, diverses équipes explorent de potentielles applications. En 2010, l'une d'elles, à l'université de Liverpool (Royaume-Uni), a fait sensation lors du 240e colloque de l'American Chemical Society, en montrant que l'eau sèche peut absorber une quantité significative de méthane, et ainsi servir à stocker voire à transporter du gaz naturel. Plus surprenant encore, l'eau sèche pourrait stocker aussi du CO_2, jusqu'à trois fois plus que de l'eau ou de la silice normales. Pour les chimistes, elle constituerait donc un bon moyen pour réaliser des puits à carbone afin de limiter le réchauffement climatique.

5 La Lune génère des marées dans le corps humain

FAUX Mers et océans voient leur gigantesque masse d'eau déplacée au gré de la position de la Lune. Bien connu, ce phénomène des marées est en effet dû aux forces gravitationnelles qu'exercent la Lune et le Soleil sur la Terre. Alors, si la Lune est capable de déplacer ces masses d'eau, pourquoi n'aurait-elle pas une action sur l'eau dont est composé à 65 % le corps humain ? Comme pour l'eau dynamisée, l'influence de la Lune sur la sève des plantes fait partie des dogmes de l'agriculture biodynamique dénué de tout fondement scientifique. En effet, si la Lune a bien un effet sur l'eau terrestre, celui-ci n'est significatif que sur les grandes masses. Car la force d'attraction de notre satellite n'est pas dépendante de la composition d'un corps, mais de sa masse et de sa distance. Or, la masse d'eau contenue dans un être humain ou une plante rend cette force négligeable. La Lune ne peut donc en aucun cas favoriser la montée de sève dans les végétaux. ■ **Hugo Jalinière**

@hugojaliniere

D. LAAGE

« Ces théories un peu loufoques sont tenaces, car les gens ont envie d'y croire »

Damien Laage, directeur de recherche CNRS au département de chimie de l'École normale supérieure de Paris

Les Grecs de l'Antiquité prisaient les bains et la natation faisait partie des sports pratiqués (ici une fresque datant du v^e^ siècle avant J.-C.).

Comment est née l'attirance pour l'eau

Un jour, quelqu'un a eu l'idée de s'immerger dans l'eau et nous en avons depuis pris l'habitude. Retour sur l'histoire de la baignade et des premières longueurs que l'humain a brassées.

Nous n'avons pas de nageoires, ni de branchies, ni même de pieds vaguement palmés… Et pourtant, nous ne ratons aucune occasion d'aller à l'eau. De la baignade de mer aux longueurs dans les piscines, en passant par un moment de délassement dans la baignoire. Pourquoi allons-nous dans l'eau si nous ne sommes pas faits pour cela ? Depuis quand l'humain est-il attiré par l'eau et à quel moment avons-nous apprivoisé cet élément ?

« *On sait que quelques grands singes ont des notions de natation. Les premiers humains sont probablement allés à l'eau pour se procurer à manger, car les abords de la mer sont une source constante de nourriture* », explique Karen Carr, professeure émérite à la faculté d'histoire de l'université de Portland aux États-Unis et auteure de *Shifting Currents, A World History of Swimming*. À l'origine, nous avons donc piqué une tête pour nous procurer du poisson et des crustacés et non pour nous baigner. Les premiers nageurs se trouvaient probablement en Afrique, où l'humain a évolué.

Au fil des années, l'eau a cessé de représenter uniquement une source de nour-

E. LESSING/ AKG IMAGES

riture pour devenir également un milieu dans lequel s'amuser et se détendre. Durant l'Antiquité, la mer et les rivières se prêtent à la baignade. En parallèle, « *la baignade à titre hygiénique trouve son origine chez les Grecs, où le bain apparaît avec la pratique sportive. L'idée voulait qu'au gymnase, on commence par se dépenser avant de se nettoyer dans une pièce dédiée* », explique Alain Bouet, professeur d'archéologie à l'université Bordeaux-Montaigne, spécialisé dans le domaine de l'hygiène à l'époque romaine.

Un lieu pour se laver, mais aussi pour se rencontrer

Après avoir pratiqué la lutte, la boxe ou la course, les athlètes grecs se lavent dans des salles avec de l'eau froide courante, des baignoires et des fontaines. Une pratique qui sera reprise et poussée à son apogée avec la civilisation romaine, à l'origine des fameux bains à la romaine. À la suite des Grecs, les Romains développent tout un processus codifié. On vient aux bains pour se laver, mais aussi pour se rencontrer. Parfois même pour lire, puisque certains d'entre eux possédaient des bibliothèques. Un lieu de vie au cœur de la société. Il existait alors dans l'Empire romain des dizaines de milliers de bâtiments thermaux.

« *Ce décrassage en profondeur se fait au départ une fois par semaine, puis tous les jours à la fin de l'Empire romain. À l'époque, la journée de travail finissait en début d'après-midi, ce qui laissait ensuite le temps d'aller au bain* », poursuit le spécialiste. Pour cela, le baigneur passe dans différents bassins. Tout commence par une séance de sport ou dans le tepidarium, une pièce chauffée destinée à ouvrir les pores de la peau. Puis, le destrictarium permet de se nettoyer, en s'enduisant d'huile qu'on vient alors racler avec un strigile, une sorte de racloir incurvé. « *Vient ensuite un bain d'eau chaude, destiné au plaisir et au délassement, appelé le caldarium. On y reste le temps qu'on souhaite, ce n'est pas destiné à l'hygiène.* » C'est le moment de profiter car vient alors le frigidarium, un bain d'eau froide pour resserrer les pores grâce à un choc thermique. « *Le processus a beau être très développé, l'hygiène n'était pourtant pas au cœur de l'époque romaine. Les bains étaient des nids à bactéries et à microbes. Tout le monde y venait avec ses maladies de peau. On peut penser que le raclage n'était pas parfait et qu'on retrouvait souvent des flaques d'huile dans le caldarium. Si on pouvait assister aux bains deux mille ans en arrière, on serait sans doute un peu horrifiés. Mais les Romains, eux, n'avaient aucune idée de ce que sont les microbes* », sourit Alain Bouet.

Au Moyen Âge, un élément à la fois attirant et source de danger

La chute de l'Empire romain en 476 signe aussi la fin des bains. Les bâtiments sont chers à entretenir, nécessitent de l'eau courante et finissent par être abandonnés. L'attrait des humains pour l'eau va alors progressivement perdre de son importance. « *Avec le développement du christianisme et la fin des dieux païens, il n'existe plus de divinités liées à l'eau, comme Poséidon ou les nymphes chez les Grecs, ou Neptune chez les Romains,* explique Eric Chaline, auteur du livre *Strokes of genius : a history of swimming. Ne survit alors qu'un seul type de divinités féminines associées à l'élément aquatique : les sirènes. Mais elles ne sont pas des créatures très sympathiques. Sans âme, elles attirent les hommes vers l'eau et les font courir à leur perte. Elles représentent bien l'idée qu'on se faisait de l'eau au Moyen Âge : à la fois un élément attirant et une source de danger dont il fallait rester éloigné.* »

L'eau, autour de laquelle se sont formés les villes et les villages, représente désormais une menace. Ce sont par les eaux qu'arrivent les bateaux ennemis. Par la mer, mais également par les fleuves. « *Il faut rappeler que les Vikings sont arrivés jusqu'à Paris en 845, un événement qui a marqué l'époque* », souligne Eric Chaline. Les épisodes successifs de peste affectent toute la population, qui redoute de s'immerger dans l'élément liquide de peur que les maladies ne s'introduisent par les pores de la peau ouverts avec l'eau chaude. La baignade n'est toutefois pas totalement abandonnée. Elle reste une activité pratiquée par les paysans, comme en témoignent certaines pages des *Très riches heures*

REPRÉSENTATIONS

Les premiers témoignages archéologiques

La preuve scientifique la plus ancienne de baignade se trouve en Europe : mis au jour en Italie, un squelette de Neandertal — un proche cousin avec qui nous avons un ancêtre commun inconnu — montre des signes d'infection de l'oreille interne, ce qu'on appelle « l'otite du baigneur ». Impossible cependant de savoir si les néandertaliens étaient des nageurs confirmés ou s'ils pataugeaient comme ils le pouvaient dans les eaux agitées. Les premières représentations connues remontent quant à elles au néolithique et se trouvent dans la grotte des Nageurs, un site d'art rupestre situé sur le plateau Gilf al-Kabir, dans le désert Libyque, en Égypte. Les peintures semblent figurer des nageurs en train de pratiquer la brasse. Bien plus tard, les hiéroglyphes de l'Égypte ancienne montrent clairement des personnes nageant le crawl.

HERITAGE IMAGES / FINE ART IMAGES / AKG IMAGES

Au XIXe siècle, les bains de mer se développent et peu à peu des villes côtières (ici Étretat) se transforment en stations balnéaires.

du duc de Berry sur lesquelles on voit, en arrière-plan, de petits personnages nager dans une rivière.

Un moyen thérapeutique avant de devenir ludique

Il faudra attendre plusieurs siècles pour que l'élite remette un pied dans l'eau. À la Renaissance, l'Europe se passionne pour la littérature, la philosophie et les arts de l'Antiquité gréco-romaine. On redécouvre d'anciens traités médicaux et des textes sur la santé. Au XVIIIe siècle, Richard Russel, médecin établi à Brighton (Royaume-Uni), s'intéresse aux propriétés médicales de l'eau de mer. On la recommande notamment dans le traitement des ganglions lymphatiques hypertrophiés. La consommation d'eau de mer et les bains deviennent pour la première fois un moyen thérapeutique : c'est le début de la mode des bains de mer. Celle-ci se répand au XIXe siècle en France, où Napoléon III et l'impératrice Eugénie fréquentent les côtes de Biarritz pour se soigner. Dieppe, Trouville, Deauville, Étretat et d'autres villes balnéaires prennent leur essor à cette époque. « *Cette médicalisation de la baignade laisse progressivement la place à la baignade ludique dans la mer, mais il faudra encore attendre un peu avant la construction de piscines dans les villes* », explique Eric Chaline. Avec la révolution industrielle, les villes se sont développées sans égouts, ni installations sanitaires. Les épidémies de choléra, de typhus et de dysenterie s'enchaînent. Dans la droite lignée des bains romains, destinés à tout le monde quel que soit son statut social, la ville de Liverpool (Royaume-Uni) ouvre la première *Bath and wash house*. On peut y fréquenter les bains publics, mais aussi y laver son linge.

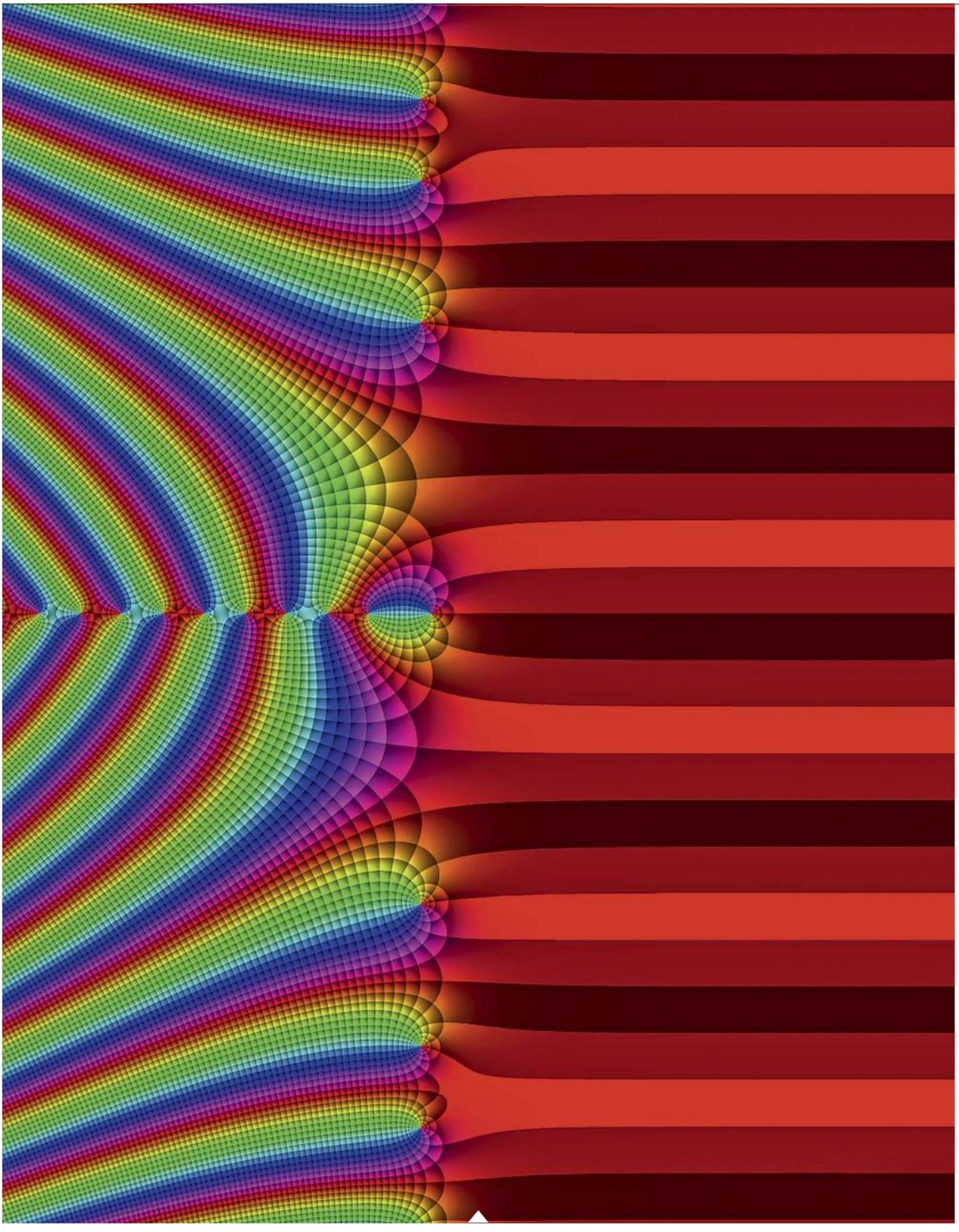
En parallèle, la nage sportive telle qu'on la conçoit aujourd'hui se démocratise. Elle est présente dès les premiers jeux Olympiques modernes, en 1896 à Athènes. « *Des piscines sont construites au XXe siècle. Soit elles comprenaient deux bassins, l'un pour les classes supérieures et l'autre pour les classes inférieures ; soit elles proposaient deux sessions de baignade, la première pour les personnes riches, qui profitaient d'une eau propre, puis une deuxième pour les plus pauvres, qui devaient se contenter d'une eau déjà usée* », détaille Eric Chaline. Avec les progrès de la médecine, les bains de mer deviendront peu à peu exclusivement associés à l'amusement et au bien-être. Tandis que les piscines, dont l'hygiène ne cessera d'être améliorée, s'ouvriront peu à peu à tous sans distinction. Afin que chacun puisse profiter des plaisirs de l'eau, comme nous le faisons depuis la nuit des temps. ■

Coralie Lemke @CoralieLemke

ALAIN BOUET

« L'hygiène n'était pas au cœur de l'époque romaine. Les bains étaient des nids à bactéries et à microbes »

Alain Bouet, professeur d'archéologie à l'université Bordeaux-Montaigne



EMPETRISOR-WIKIMEDIA COMMONS CC BY-SA 4.0

La fonction zêta de Riemann possède un nombre infini de points où elle s'annule (ses zéros), situés dans les tourbillons de couleur de ce graphique. Les zéros les plus intéressants se trouvent le long d'une ligne unique, verticale, là où les bandes colorées rejoignent les rouges.

Nombres premiers

Le mystère de leur répartition bientôt résolu ?

Le mathématicien Yitang Zhang prétend apporter une solution partielle à la conjecture de Riemann, l'un des problèmes mathématiques du millénaire. Les spécialistes échouent en effet à comprendre finement la manière dont les nombres premiers se répartissent parmi les autres nombres.

Par Clémentine Laurens

Novembre 2022. C'est l'effervescence dans la communauté mathématique : *« Il paraît que ça bouge autour de la conjecture de Riemann ! »* Les bruits de couloir vont bon train, entre l'espoir des uns et le scepticisme des autres. Il faut dire que la conjecture de Riemann n'est rien de moins que l'un des plus importants problèmes ouverts de la discipline. Un énoncé dont la majorité des spécialistes sont persuadés qu'il est exact, mais qu'ils échouent à démontrer depuis plus d'un siècle et demi, malgré des efforts acharnés. Or, si elle était enfin prouvée, cette hypothèse permettrait un bond spectaculaire dans la compréhension d'objets mathématiques fondamentaux : les nombres premiers — ces entiers qui ne peuvent être divisés que par 1 ou eux-mêmes : 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, etc.

« Les nombres premiers, c'est le début des mathématiques, sourit Cécile Dartyge, chercheuse en théorie des nombres à l'institut Élie-Cartan, à Nancy. *Tout mathématicien a d'abord été un peu arithméticien.* » En effet, ajoute Florent Jouve, chercheur dans le même domaine à l'université de Bordeaux : *« On peut considérer que vouloir comprendre les nombres entiers, c'est ça la vraie question, le point de départ de l'arithmétique.* » Or les nombres premiers sont les briques élémentaires qui permettent de construire tous les autres : n'importe quel entier positif peut s'écrire sous la forme d'un produit de ▸

nombres premiers — et cerise sur le gâteau, pour chaque entier ce produit est unique ! Ils constituent donc une porte d'entrée privilégiée vers toute l'arithmétique : en étudiant les nombres premiers, on s'intéresse indirectement à tous les nombres entiers.

Un mystère qui suscite passions, hypothèses et erreurs

« *Pourtant,* soupire Florent Jouve, *ils restent assez mystérieux.* » En particulier, les spécialistes échouent à comprendre finement la manière dont ils se répartissent parmi les autres nombres. Si l'on examine tous les entiers positifs jusqu'à une certaine valeur, combien parmi eux seront premiers ? Quand on connaît tous les nombres premiers jusqu'à un certain point, peut-on prédire quel sera le suivant ? Ou tout du moins, estimer comment évolue la différence entre deux nombres premiers consécutifs, quand on considère des nombres de plus en plus grands ? Ces questions fondamentales et multiséculaires n'ont aujourd'hui encore que des réponses partielles. Elles font l'objet de recherches actives… Impliquant, de manière centrale, la fameuse hypothèse de Riemann. Formulée en 1859 par Bernhard Riemann, le mathématicien allemand qui lui a donné son nom, cette conjecture porte sur les points d'annulation d'une certaine fonction — appelée « zêta de Riemann » et désignée par la lettre grecque ζ. « *Zêta, c'est un outil analytique qui encode une grande partie des propriétés des nombres premiers* », explique Florent Jouve. Cécile Dartyge précise : « *Si on connaissait les endroits où la fonction s'annule, cela nous donnerait automatiquement une meilleure connaissance de la répartition des nombres premiers.* »

AKG IMAGES

Bernhard Riemann (1826-1866) formula en 1859 sa fameuse hypothèse sur les zéros de la fonction zêta.

Forcément, un sujet d'une telle importance suscite des passions. D'ailleurs, nombreux sont les mathématiciens, professionnels ou amateurs, qui prétendent avoir levé le mystère et démontré que la conjecture est vraie. Et ils sont presque aussi nombreux à revendiquer le contraire. On trouve ainsi sur Internet des dizaines d'entrées de type « *Proof of the Riemann hypothesis* » (« Preuve de l'hypothèse de Riemann ») ou « *The Riemann hypothesis is false* » (« L'hypothèse de Riemann est fausse »), sous la forme de prépublications déposées sur le site arXiv ou de billets de blog. La communauté mathématique prête en général peu d'attention à ces supposées démonstrations, qui sont souvent grossièrement erronées dès les premières lignes…

Mais fin 2022, le scénario est tout autre. Car celui qui aurait permis une avancée sur le sujet n'est pas n'importe qui : Yitang Zhang, un mathématicien sino-américain qui s'est déjà illustré par des percées spectaculaires dans l'étude des nombres premiers. Il n'en faut pas plus pour que la presse s'emballe : « Yitang Zhang confirme une solution partielle à l'hypothèse de Riemann » titre le 8 novembre le site Web d'information chinois Pandaily. Pourtant, à bien y regarder, on ne trouve aucune mention explicite de la fameuse conjecture dans les 111 pages de l'article mis en ligne quatre jours auparavant par le chercheur. Et pour cause : « *Il est tout simplement faux d'affirmer que Yitang Zhang s'approche de l'hypothèse de Riemann avec ce papier* », assène Gergely Harcos, chercheur en théorie des nombres à l'institut de mathématiques Alfréd-Rényi à Budapest, en Hongrie, spécialiste du sujet.

Une fonction définie sur tous les nombres complexes

Douche froide ? Non. Car même en écartant une avancée sur la conjecture de Riemann, l'intérêt des spécialistes pour le travail du mathématicien sino-américain reste élevé. Sa prépublication, intitulée « *Discrete mean estimates and the Landau-Siegel zero* », concerne en fait un autre énoncé central en théorie des nombres : une conjecture portant sur le « zéro de Siegel ». En substance, il s'agit de démontrer que les « zéros » d'un certain type de fonctions — c'est-à-dire les points auxquels elles s'annulent —

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^s} = 1 + \frac{1}{2^s} + \frac{1}{3^s} + \frac{1}{4^s} + \cdots$$

Associer une fonction à une certaine suite numérique est une idée centrale en théorie des nombres. Ici, cela définit la fonction zêta de Riemann, intimement liée à la répartition des nombres premiers.

SÉCURISATION

Un rôle clé en cryptographie

Si l'on connaît deux très grands nombres premiers, il est facile de calculer leur produit — un ordinateur fait cela très rapidement. Mais réciproquement, retrouver deux grands facteurs premiers à partir de leur produit est un problème d'une autre envergure ! Parce que les nombres premiers nous échappent encore par bien des aspects, décortiquer un tel produit est en général extrêmement long et ardu, même pour nos ordinateurs. À tel point que c'est sur la difficulté de ce problème que repose RSA, un protocole de cryptographie très répandu, qui sert à chiffrer des données pour pouvoir les échanger de manière sécurisée. En somme, les mystères des nombres premiers protègent le secret nos communications.

ne sont jamais trop proches d'une certaine région. « *Les fonctions auxquelles on s'intéresse s'appellent fonctions L de Dirichlet,* détaille Florent Jouve. *On aimerait démontrer que, pour ces fonctions, un certain type de zéro "exceptionnel" n'existe pas. Mais on n'arrive pas à le prouver. Ce que prétend Yitang Zhang, c'est qu'il est parvenu à comprendre beaucoup plus précisément où se situerait cet hypothétique "zéro de Siegel".* » « *Le travail de Yitang Zhang reste très éloigné de l'hypothèse de Riemann, et ne constitue même pas une preuve de la conjecture sur le zérosde Siegel,* reprend Gergely Harcos. *Reste que si sa démonstration est juste, cela constituera tout de même un immense progrès pour les théoriciens des nombres !* »

Mais comment diable en est-on venu à étudier les points d'annulation de fonctions bizarres pour tenter de comprendre les nombres premiers ? Pour bien des chercheurs et chercheuses, c'est ce genre de ponts entre des domaines en apparence éloignés des mathématiques qui font la beauté de la discipline. Sa magie. Sa puissance. Car historiquement, de tels liens se sont révélés incroyablement féconds — en particulier dans le domaine de la théorie des nombres.

La fonction zêta est initialement définie pour tous les nombres réels $s>1$ par une formule *(voir l'image p. 82)*. Dès 1735, elle est étudiée par le mathématicien suisse Leonhard Euler, qui démontre notamment que la somme de l'inverse des carrés de nombres entiers vaut $\pi^2/6$. Il généralise ce résultat en démontrant une formule qui donne explicitement la valeur de ζ pour tous les entiers positifs pairs.

Mais c'est au milieu du XIXe siècle que la véritable révolution intervient. C'est alors le plein essor de l'analyse complexe. Cette discipline porte sur l'étude des fonctions complexes, c'est-à-dire celle qui associent un nombre complexe à un autre nombre complexe — là où les fonctions plus traditionnelles prennent un nombre réel et lui associent un nombre réel (un nombre complexe z s'écrit $a + ib$, où a et b sont des nombres réels et i un nombre tel que $i^2 = -1$). Bernhard Riemann a alors l'idée — lumineuse — de prolonger la fonction ▸

PARCOURS

Yitang Zhang, les nombres premiers chevillés au corps

Né en 1955, Yitang Zhang est un mathématicien sino-américain, spécialiste de théorie des nombres. Après des études à l'université de Pékin, en Chine, puis à l'université Purdue, aux États-Unis, il peine pendant quelques années à trouver un poste de chercheur, mais finit par être embauché à l'université du New Hampshire. Ses recherches tournent autour des nombres premiers. Il s'intéresse d'abord à la conjecture de Landau-Siegel, puis se tourne vers un autre problème central du domaine : la conjecture des nombres premiers jumeaux, qui prétend qu'il existe une infinité de nombres premiers qui ne diffèrent que de deux (comme 11 et 13 ou 29 et 31). En 2013, Yitang Zhang est propulsé sur le devant de la scène mathématique mondiale par la démonstration d'une forme faible de cet énoncé : il existe une infinité de nombres premiers qui diffèrent de moins de 70 millions. Une véritable prouesse qui ouvrira la voie à une collaboration mondiale sur ce sujet. Mais la conjecture de Landau-Siegel lui tourne toujours dans la tête. Fin 2022, Yitang Zhang met en ligne une prépublication qui prétend affiner la compréhension de ce problème — sans pour autant le résoudre entièrement. Quelle sera la postérité de ce travail ? L'avenir le dira, car la preuve doit encore être validée par la communauté mathématique.

PETER BOHLER/TRUNK ARCHIVE

Le mathématicien sino-américain est devenu célèbre en 2013 pour sa démonstration d'une forme faible de la conjecture des nombres premiers jumeaux.

CÉCILE DARTYGE

« La fonction zêta vérifie une jolie équation qui permet d'établir un lien explicite entre ses zéros et la répartition des nombres premiers »

Cécile Dartyge, chercheuse en théorie des nombres à l'institut Élie-Cartan (université de Lorraine), à Nancy

zêta pour en faire une fonction définie sur tous les nombres complexes (à l'exception de 1, pour des raisons techniques), afin de pouvoir l'étudier avec des outils issus de ce nouveau champ de l'analyse. *« Ce qui est très puissant, c'est qu'une fois prolongée comme Bernhard Riemann l'a fait, la fonction zêta vérifie une jolie équation fonctionnelle — une relation entre fonctions —, qui permet d'établir un lien explicite entre ses zéros et la répartition des nombres premiers »*, souligne Cécile Dartyge.

Nous y voilà : le problème fondamental de la répartition des nombres premiers est devenu un problème d'étude des zéros d'une fonction complexe. Or, si certains des zéros de zêta sont bien connus — on parle de « zéros triviaux », et il s'agit de tous les entiers pairs strictement négatifs — d'autres persistent à nous échapper. Car si l'on visualise l'ensemble des nombres complexes comme un plan, on sait que les zéros « non triviaux » sont tous localisés dans une certaine bande. Mais l'hypothèse de Riemann prétend qu'ils sont en réalité tous situés sur une même droite du plan complexe, bien rangés. Une hypothèse largement confirmée par les simulations numériques que l'on a effectuées, mais que des générations de chercheurs se sont acharnées à essayer de démontrer. En vain. *« C'est un problème extrêmement difficile*, insiste Florent Jouve. *En témoignent tous les efforts qui ont déjà été déployés pour tenter de le résoudre, sans succès. »* Aujourd'hui, on s'évertue à réduire la zone dans laquelle on sait que tous les zéros non triviaux sont situés, pour tenter de la rapprocher de la droite pressentie par Bernhard Riemann.

Prudence et scepticisme sont de rigueur

Quel rapport avec les travaux de Yitang Zhang ? *« La conjecture qui prétend qu'il n'existe pas de zéro "exceptionnel" pour les fonctions L de Dirichlet est une conséquence de l'hypothèse de Riemann*, explique Andrew Granville, de l'université de Montréal (Canada). *Plus précisément : s'il existait un tel zéro, cela démontrerait que la conjecture de Riemann est fausse. On cherche donc à démontrer que ce n'est pas le cas. »* Au mieux Yitang Zhang a-t-il donc démontré qu'il sera encore plus difficile que prévu de trouver un contre-exemple à l'hypothèse de Riemann… Ce qui est bien loin d'apporter la preuve de son exactitude.

Sans compter que la justesse des travaux du mathématicien sino-américain laisse aujourd'hui un certain nombre de spécialistes sceptiques. Terence Tao, référence mondiale dans le domaine, avait repéré des coquilles dans la prépublication dès la mi-novembre 2022, appelant à la prudence. Un mois plus tard, Gergely Harcos lui aussi se disait *« moins optimiste qu'au départ quant à l'exactitude des résultats présentés »*. À l'heure actuelle, le papier n'est toujours ni accepté pour publication, ni rejeté. Mais même dans l'hypothèse de travaux finalement invalidés par la communauté, reste — toujours — l'espoir d'y trouver des idées nouvelles pour poursuivre les recherches. Une certitude demeure en tout cas : l'effervescence qu'a suscitée cette affaire est symptomatique de l'importance accordée aux questions tournant autour de la théorie analytique des nombres et de sa quête, formidablement actuelle, de la répartition des nombres premiers. ■

DÉFIS

Les « problèmes du millénaire »

L'hypothèse de Riemann est l'un des « problèmes du millénaire ». Cette liste, établie par l'institut de mathématiques Clay (CMI, université du New Hampshire, États-Unis) et annoncée en grande pompe le 24 mai 2000 au Collège de France à Paris, comprend sept questions mathématiques considérées comme *« certains des problèmes les plus difficiles avec lesquels se débattaient les mathématiciens au tournant du millénaire »*. Elle est inspirée des 23 problèmes listés en 1900 par le grand mathématicien allemand David Hilbert, qui considérait — à raison — que ces questions marqueraient les mathématiques du XXe siècle. Fait remarquable : l'hypothèse de Riemann apparaissait déjà dans les problèmes de David Hilbert. Un prix d'un million de dollars américains (un peu plus de 930 000 euros) est attribué par le CMI pour la résolution de chacune des sept questions. À l'heure actuelle, un seul problème a cédé — la conjecture de Poincaré, énoncée en 1904 par le Français Henri Poincaré et démontrée un siècle plus tard par le Russe Grigori Perelman. Pour cet accomplissement, le chercheur s'est vu attribuer la prestigieuse médaille Fields en 2006 puis le prix du millénaire du CMI en 2010… Distinctions qu'il a toutes deux refusées !

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

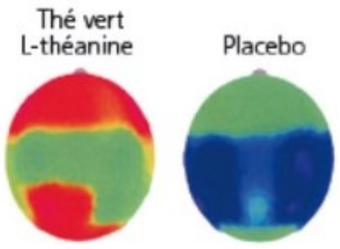
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 84 20 63 16** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**

SOPHIE ADENOT
ASTRONAUTE

« Les missions sur la Lune me font rêver »

La nouvelle astronaute française sélectionnée par l'Agence spatiale européenne a commencé son entraînement à Cologne, en Allemagne. Entretien avec cette pilote d'essai d'hélicoptère, ancienne étudiante de l'Isae-Supaéro et du MIT, qui se réjouit déjà de mener des expériences à bord de la Station spatiale internationale.

Sélectionnée parmi 22 500 candidatures, la nouvelle astronaute française Sophie Adenot a commencé son entraînement au Centre des astronautes européens (EAC) de Cologne, en Allemagne, avec les quatre autres membres de sa promotion. Comme Thomas Pesquet par le passé, elle se prépare à partir dans l'espace, d'abord sur la Station spatiale internationale (ISS), et peut-être pour des missions lunaires à l'horizon 2030. Un mois après le début du programme, la pilote d'essai d'hélicoptère de 40 ans, lieutenante-colonelle de l'armée de l'air et de l'espace, nous livre ses premières impressions.

Comment passe-t-on de l'habitacle d'un hélicoptère à celui de la Station spatiale internationale ?
Par de nombreuses heures de cours théoriques, d'abord. Nous avons commencé les cours de biologie et de médecine spatiale, de compréhension de l'environnement et des contraintes fortes que l'espace impose sur le corps humain. C'est un tout nouveau domaine d'apprentissage pour moi. Dans un deuxième temps, il y aura beaucoup d'entraînements « opérationnels » — des sorties extravéhiculaires en piscine par exemple. L'accent est aussi beaucoup mis sur l'apprentissage en équipe, car les missions spatiales sont si complexes qu'elles ne peuvent être menées que par des collectifs bien rodés : équipes au sol, équipes d'ingénieurs et de techniciens, équipage à bord de l'ISS…

Un mois après votre entrée à l'EAC, l'entraînement correspond-il à l'image que vous vous en étiez faite ?
C'est une formation de très haut niveau, encore meilleure que ce que j'avais imaginé. Je suis vraiment comme une enfant dans un magasin de jouets ! J'ai envie de tout voir, tout essayer, tout découvrir. Il y a une équipe de talents incroyables dans ma promotion et dans les instructeurs qui viennent à l'EAC pour nous transmettre les compétences essentielles.

Avez-vous un domaine scientifique de prédilection ?
J'aime la diversité, je suis heureuse de la variété des domaines scientifiques et technologiques qui sont l'essence de ce métier. Au MIT (Massachusetts Ins-

BIO EXPRESS

- **Juillet 1982 :** Naissance à Cosne-Cours-sur-Loire (Nièvre).
- **2004 :** Diplômée de l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (Isae-Supaéro) à Toulouse. Étudie au MIT (États-Unis).
- **2008 :** Affectée à l'escadron d'hélicoptères 1/67 « Pyrénées » de l'armée de l'air, unité en charge d'opérations de secours militaire.
- **2012 :** Rejoint l'escadron de transport 60, où elle convoie de hautes personnalités aux commandes d'un Super Puma.
- **2018 :** Devient la première femme pilote d'essai d'hélicoptère en France.
- **2022 :** Sélectionnée parmi les 17 nouveaux astronautes de l'Agence spatiale européenne.

INA FASSBENDER / AFP

À 40 ans, l'ingénieure et lieutenante-colonelle Sophie Adenot devient la onzième astronaute française.

titute of Technology) aux États-Unis, j'ai beaucoup apprécié ce que j'ai étudié : les interactions humain-machine. Il s'agit de la conception d'un véhicule dans lequel le binôme « être humain-machine » est optimisé afin de fonctionner le mieux possible pour mener à bien une mission. En l'occurrence, j'ai fait ma thèse de *master of science* sur le thème de la gravité artificielle — qui sert à combattre les effets de la microgravité sur le corps humain dans l'espace — et sur l'adaptation à cette gravité du système vestibulaire, situé dans l'oreille, qui permet de conserver l'équilibre.

Aimeriez-vous poursuivre ces recherches dans l'ISS ?
Les expériences à bord de la Station spatiale internationale sont extrêmement variées : santé, médecine, physique fondamentale, démonstrateurs technologiques… C'est donc sans préférence particulière que je serais ravie de contribuer aux expériences qui me seront confiées pour faire progresser la science et la recherche. Je suis tout à fait prête à sortir de mes domaines de prédilection. J'aime me mettre au défi, à la fois physiquement et mentalement, sortir de ma zone de confort, apprendre de nouvelles choses pour les comprendre et les transmettre. Peu importe le domaine, je serai contente.

Comment envisagez-vous l'exploration spatiale aujourd'hui ?
Nous sommes à une période charnière qui implique des changements rapides dans le secteur spatial. En 2023, personne n'est capable de prédire avec certitude ce qui va se passer dans les prochaines décennies. L'environnement de l'exploration spatiale et les nouvelles technologies se sont développés tellement vite que dans dix ans, quand on regardera en arrière, on ne pourra qu'être surpris par le chemin parcouru. Aujourd'hui, ce qui se profile pour notre promotion, ce sont d'abord des missions de recherche dans ce laboratoire volant qu'est l'ISS et ensuite, peut-être, des missions d'exploration plus lointaines.

La mission Artemis 2 de la Nasa emportera des astronautes en 2024 pour faire le tour de la Lune sans s'y poser, tandis qu'Artemis 3 doit marquer le retour sur notre satellite en 2025. Que vous évoque cette perspective ?
Je donne le meilleur de moi-même dans cet entraînement. Je me prépare avec concentration et détermination pour ma première mission sur l'ISS ainsi que pour la suite. Bien sûr, les missions sur la Lune me font rêver. Aucun astronaute ne dira le contraire ! Mais pour l'instant, je vais faire les choses étape par étape. Et apprécier le chemin, quelle que soit la destination, c'est le plus important. Aujourd'hui, ce chemin, c'est mon entraînement appelé « *Basic Training* » à l'EAC *(lire l'encadré p. 88)*.

Appréhendez-vous de vous retrouver confinée dans l'ISS, voire dans le scaphandre ?
J'adore les grands espaces, mais j'aime tout autant les petits habitacles des hélicoptères. Je suis donc habituée à rester confinée des heures dans un espace réduit à attendre, parfois longtemps,

PROGRAMME

Au cœur de la formation des astronautes européens

ESA - S. CORVAJA

Les nouveaux élèves découvrent les installations de l'EAC.

Une quarantaine de matières sont enseignées au Centre des astronautes européens (EAC) de Cologne (Allemagne), où s'entraînent les futurs explorateurs spatiaux. Au programme : biologie, sciences des matériaux, spectrométrie ou encore l'orbitographie, qui étudie la détermination des éléments orbitaux d'un satellite artificiel. L'essentiel de la formation se fait donc en salle de classe. Testés en permanence sur des QCM, ils doivent obtenir au moins 75 % de bonnes réponses ; rarement un problème. « *Ici, l'échec n'est pas une option,* pose Hervé Stevenin, aquanaute, chef de l'unité d'entraînement aux sorties extravéhiculaires. *Les futurs astronautes sont au maximum de leurs performances tout le temps. S'ils commettent des erreurs, ce n'est pas eux qu'il faut corriger. C'est nous, les instructeurs, qui avons failli.* » En parallèle, ces élèves d'élite apprennent à utiliser les modules de l'ISS dans une reproduction grandeur nature du laboratoire Columbus. C'est aussi là qu'ils s'entraînent aux situations d'urgence. Des masques et des extincteurs se trouvent à bord pour parer à toute éventualité. Les sorties extravéhiculaires, elles, sont reproduites au fond d'une piscine. Il s'agit d'y maîtriser toutes les procédures de sécurité et de maintenance sur la station avec un équipement pouvant atteindre 150 kg. « *Quand on forme un futur astronaute, impossible de tout faire à la fois. Le module de biologie ne peut pas être installé dans la piscine pour s'essayer au travail de laboratoire en apesanteur. Ces deux compétences sont apprises séparément ; au cerveau, ensuite, de tout intégrer lors du séjour dans l'espace.* » Depuis peu, les casques de réalité virtuelle sont ainsi utilisés pour faire apparaître aux astronautes leur futur environnement en grandeur nature. « *C'est très utile pour leur apprendre à se repérer là-haut* », estime Hervé Stevenin.

l'ordre de décoller. Chaque lieu, chaque mission apportent son lot de surprises. Ce qui me paraît important, c'est de savoir s'adapter. Il y a un temps pour tout, et quel que soit le lieu, je suis heureuse. En parallèle, dans le cadre de mes loisirs, je profite de chaque instant en faisant beaucoup de sport en extérieur. J'adore la montagne, où j'aime me ressourcer.

Comment profitez-vous de la nature ?
Par le sport ! Il y a trois constantes dans les activités que je pratique depuis toujours : la course à pied, le yoga et le vélo. C'est aussi ce qui me permet de rester en forme en tant qu'astronaute. Mais à côté de ça, je suis une touche-à-tout : j'aime tester de nouvelles activités, découvrir de nouvelles sensations, comme sur un kite-surf en été, en ski de randonnée l'hiver, ou encore la nage en eau froide, l'apnée… C'est la diversité qui attise ma curiosité !

Croisez-vous souvent votre collègue français Thomas Pesquet ?
De temps en temps, mais il est très occupé. Cependant, lorsqu'il est là, je profite de ce temps précieux pour lui poser des questions sur son expertise opérationnelle. De par son expérience, il est un référent pour moi. Mais au quotidien, c'est l'astronaute allemand Alexander Gerst qui nous accompagne et qui est le mentor de notre promotion.

Une des principales vertus d'un astronaute est la patience. Thomas Pesquet n'est parti dans l'espace qu'après sept ans d'entraînement… Comment gérez-vous cette attente ?
J'apprécie chaque jour d'entraînement car le temps passé dans l'espace est vraiment mineur dans une carrière d'astronaute, dont la plus grande partie se passe au sol. Je prends le temps d'avancer et je ne me mets pas de pression pour un objectif. J'aime la philosophie du *carpe diem* : demain est un autre jour ! Ce qui ne m'empêche pas de bien me préparer à ce « demain ». Chaque chose en son temps ! ■ **Propos recueillis par Coralie Lemke**

@CoralieLemke

Le magazine des passionnés d'histoire

L'Histoire

L'Histoire

www.lhistoire.fr

NUMÉRO DOUBLE

116 pages

LA PESTE

Itinéraire d'une tueuse

par Patrick Boucheron

- Les fausses pestes de l'Antiquité
- Peste noire : 2 Européens sur 3
- Une maladie chinoise
- Le rat, la puce et la marmotte
- Ce que révèle l'ADN

Le Triomphe de la Mort, Palerme, vers 1446

ALL 8,70 € - BEL 7,90 € - ESP 7,90 € - GR 7,90 € - ITA 7,90 € - PORT/CONT 7,90 € - LUX 7,90 € - CH 12,50 FS - MAR 73 0H - TUN 10,50 TND - TOM/S 1850 XPF - DOM/S 7,90 € - CAM 11,99 $ CAN

Actuellement en kiosque et sur www.lhistoire.fr

Un an après les feux, les Landes veulent se réinventer

Face aux mégafeux qui accompagnent le réchauffement climatique, l'inquiétude est vive quant à l'avenir du plus grand massif européen de monoculture d'arbres. Les chercheurs étudient la capacité des pins à résister à la sécheresse et recherchent des variétés plus adaptées dans les pays du Sud. Surtout, ils pointent l'intérêt de mélanger dans le futur les espèces d'arbres.

La faiblesse des pluies de l'hiver 2022-2023 a ravivé de mauvais souvenirs. Les pompiers surveillant le million d'hectares de la forêt landaise savent que les conditions sont favorables pour le retour du feu. Les images sont encore dans toutes les mémoires des torches enflammées embrasant en juillet et août 2022 les pins maritimes des communes girondines de La Teste-de-Buch et de Landiras : 40 000 hectares en cendres. Et une question existentielle : est-il bien raisonnable de continuer à produire du pin en monoculture quand le changement climatique rend les sécheresses plus longues et augmente l'inflammabilité du résineux ? Depuis 2017, plus d'un tiers du territoire français a été concerné par des mesures de restriction d'eau et depuis août 2021, seuls trois mois ont connu une pluviométrie normale, tous les autres étant déficitaires.

Pour éviter qu'un épisode d'incendie incontrôlable ne se reproduise, les sapeurs-pompiers de Nouvelle-Aquitaine resserrent donc leur surveillance. Mais au-delà de cet objectif, les scientifiques explorent des solutions à plus long terme. Il leur a certes d'abord fallu répondre à des questions d'urgence. Pourquoi une telle virulence du feu ? « *Ce que l'on constate, c'est que les parcelles de La Teste-de-Buch étaient mal entretenues, avec des sous-bois embroussaillés de fougères et de bruyères, ce qui a donné du carburant au feu. Pour Landiras, il s'agit plutôt de plantations jeunes où les arbres n'étaient pas assez hauts pour se protéger des flammes* », explique Hervé Jactel, directeur de recherche en entomologie forestière et biodiversité à l'unité de recherche Biodiversité, gènes et communautés (Biogeco, Inrae/université de Bordeaux).

Pinus pinaster est en effet une espèce pyrophyte. Pour réduire l'impact du feu, l'arbre se débarrasse de ses branches basses au fur et à mesure de sa crois-

COLONISATION

Un méditerranéen adapté aux Landes

Le pin maritime est présent dans les Landes depuis la fin de l'ère glaciaire, il y a 20 000 ans. Occupant seulement le pourtour méditerranéen sur toute la surface du globe, l'arbre est remonté peu à peu vers le nord avec le réchauffement des températures. La Gironde constitue la limite nord de son aire de répartition, d'où sa capacité à s'adapter à des températures plus élevées. C'est au XIXe siècle que sa monoculture s'est imposée sur des landes marécageuses autrefois dévolues à l'élevage.

Pour se protéger du feu, le pin des Landes (« Pinus pinaster ») se débarrasse de ses branches basses au fur et à mesure de sa croissance. Or, lors de l'été 2022, les arbres étaient trop jeunes et leurs branches, en contact avec fougères et bruyères, se sont embrasées.

J-F TRIPELON-JARRY / ONLYFRANCE.FR

sance pour conserver un houppier (les branches sommitales) peu fourni et hors d'atteinte de la combustion des végétaux proches du sol. Or, à Landiras, les pins n'avaient qu'une quinzaine d'années, soit un tiers de leur vie avant abattage ; les houppiers étaient donc en contact avec les fougères et bruyères. « *Si on était dans une telle situation, c'est parce que ces zones venaient d'être replantées après les grandes tempêtes de 1999* », poursuit Hervé Jactel *(lire l'encadré p. 92)*. Le changement climatique a ainsi affecté le massif forestier, d'abord par une augmentation de la violence des tempêtes, ensuite par la sécheresse, et ce à trente ans d'intervalle.

Les coopératives forestières qui ont la haute main sur la gestion du plus grand massif européen de monoculture d'arbres se sont naturellement tournées vers les chercheurs pour obtenir des réponses à leurs interrogations. Le lien est ancien et institutionnel par l'intermédiaire du Groupement d'intérêt scientifique pour l'amélioration génétique et la sylviculture du pin maritime. « *Les forestiers nous ont d'abord demandé une méthode pour savoir quels arbres étaient morts et devaient être abattus et ceux qui pouvaient être gardés* », expose Sylvain Delzon, chercheur au Biogeco. Sans surprise, les dégâts se sont révé-

lés moins importants sur les peuplements de plus de 20 mètres, où le feu n'a ravagé que les végétations basses. « *Puis nous avons pu déterminer par la technique d'épifluorescence, qui nous indique si une cellule végétale est morte ou vivante, qu'une très faible vitalité au niveau des racines implique une survie nulle et donc l'abattage,* poursuit Sylvain Delzon. *Nous avons également établi qu'en dessous de 70 % de destruction des épines du houppier, l'arbre pouvait continuer à faire circuler sa sève et donc survivre.* »

Au-delà de cet apport technique, le laboratoire Biogeco étudie depuis de très nombreuses années la résistance des arbres à la sécheresse. La principale menace pour ces êtres tout en longueur, c'est l'embolie. L'eau puisée dans le sol est apportée par pression jusqu'aux feuilles ou épines où se produit la photosynthèse grâce à un réseau de conduites solides formées de lignine, le xylème. Cette sève se charge ensuite en glucides diffusés dans l'arbre grâce à un réseau de tissus vivants, le phloème. « *Lors d'un épisode de sécheresse, l'arbre doit faire un arbitrage. Garder son eau implique de fermer ses stomates, les petits opercules qui permettent la captation du CO_2, et dans ce cas, la photosynthèse s'arrête* », détaille Sylvain Delzon. L'arbre évite ainsi que l'eau venant à manquer dans le xylème soit remplacée par de l'air qui provoquerait l'embolie. Pour étudier ce phénomène, les chercheurs du Biogeco soumettent des branches à une centrifugeuse, ce qui permet de reconstituer les effets d'une sécheresse intense. Ces rameaux sont ensuite soumis à un examen par synchrotron pour repérer les vaisseaux touchés par l'embolie.

NICOLAS BERTRAND / INRAE

Des relevés sont opérés sur des pins dans l'unité expérimentale de l'Inrae dans la forêt de Pierroton, à Cestas (Gironde).

Une sélection génétique des pins les plus résistants

Résultat : mieux que le hêtre ou le chêne, le pin résiste bien à la sécheresse. Son aire naturelle de répartition autour du bassin méditerranéen le prédispose à pallier le manque d'eau. Si bien que les individus de l'île de Pantelleria, au large de la Sicile, se contentent de 300 millimètres de pluie par an. Mais cette résistance est-elle la même pour le pin landais ? Celui-ci est en effet issu de programmes d'amélioration génétique.

PLANTATIONS

Les avantages du mélange d'essences

Une même espèce d'arbres plantée en lignes, est-ce bien raisonnable ? La question se pose depuis les tempêtes de 1999 qui ont vu 200 000 hectares de la forêt de pins landaise être détruits par les vents. 47 % des peuplements en France sont considérés comme « monospécifiques » par l'Inventaire forestier national. Depuis une vingtaine d'années, le réseau scientifique Treedivnet compare la productivité des espaces en monoculture avec ceux où les essences sont mélangées. « *Ici, à Cestas (Gironde), nous observons ainsi les mélanges de pins maritimes avec des bouleaux, des chênes pédonculés et des chênes verts* », expose Hervé Jactel, qui gère 12 hectares où se côtoient 256 placettes en mélange. Dans les Landes, comme partout ailleurs dans le monde, le match donne toujours le même résultat : la production de biomasse est supérieure de 25 % pour les mélanges, le carbone stocké par les arbres augmente de 70 % et les attaques de ravageurs diminuent de 40 à 50 %. « *Il y a trois sortes d'explication,* note Hervé Jactel. *En mélange, on peut planter plus d'arbres à l'hectare parce qu'ils occupent des hauteurs de canopée et des profondeurs de racines différentes. Ensuite, chaque espèce d'arbre aide sa voisine à fertiliser le sol. C'est le cas du bouleau avec le pin. Enfin, le mélange leurre les insectes ravageurs spécialisés dans une espèce d'arbre, qui ont ainsi plus de mal à trouver pitance.* » Le mélange des essences représente donc une solution séduisante. Sauf que la plantation d'une seule espèce en ligne reste la seule à pouvoir être exploitée industriellement. Les professionnels du bois tendent à enregistrer une première évolution en ce sens : le bocage forestier, qui consiste à planter des feuillus en bordure des alignements de résineux, est une idée qui progresse. De fait, les incendies de 2022 ont au moins montré que ces « haies » arborées ralentissaient l'avancée du feu.

SYLVAIN DELZON

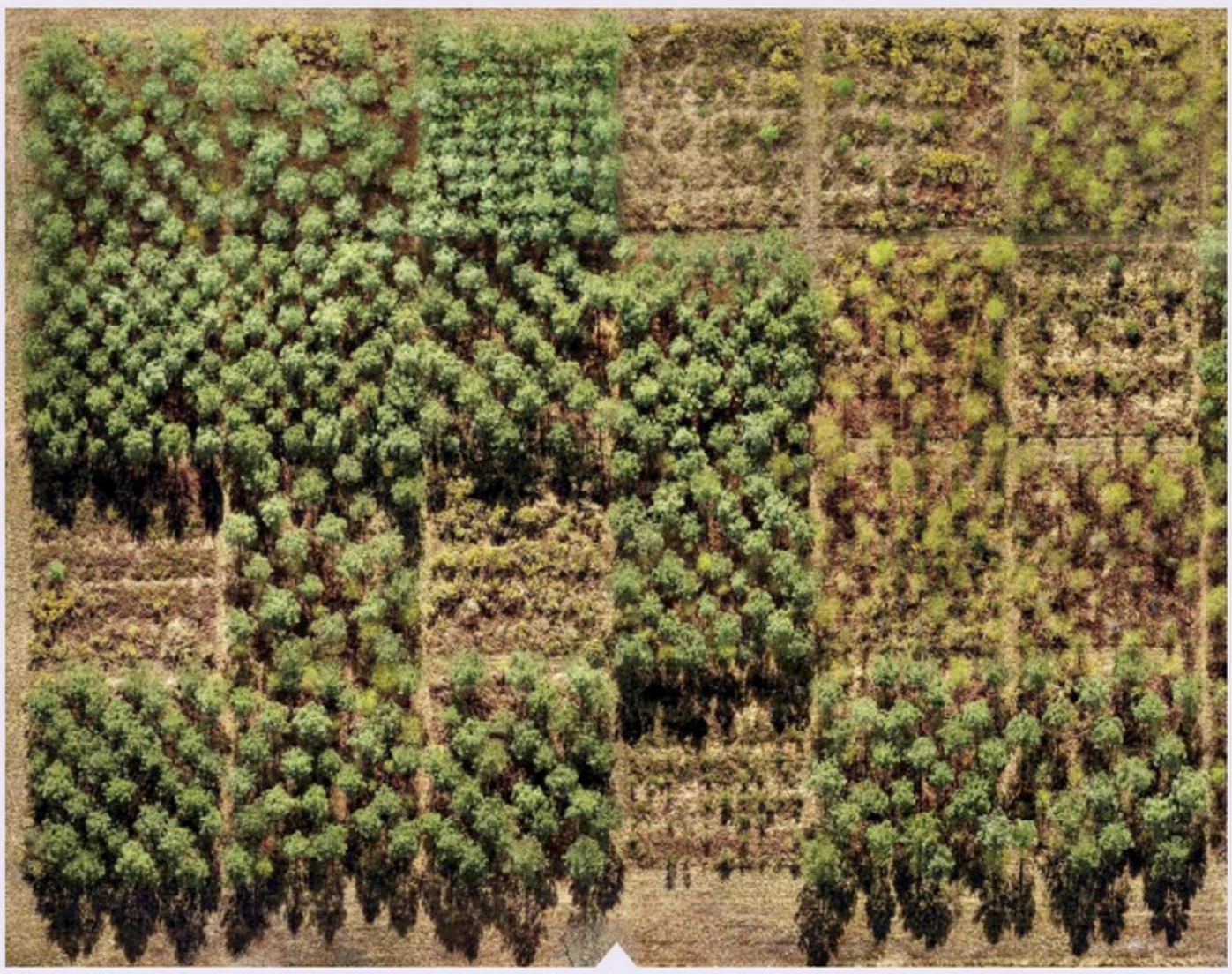
« En dessous de 70 % de destruction des épines du houppier, l'arbre peut continuer à faire circuler sa sève »

Sylvain Delzon, écophysiologiste au laboratoire Biodiversité, gènes et communautés (Biogeco, Inrae et université de Bordeaux)

« *Depuis les années 1960, on sélectionne les pins qui poussent le plus vite, ont un tronc droit plus facile à exploiter et des branches petites pour éviter les nœuds dans le bois,* assure Annie Raffin, ingénieure de recherche à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). *Mais pour les trois générations développées (la quatrième est en cours), le caractère de résistance à la sécheresse n'a jamais été recherché.* » En utilisant le cavitron, les chercheurs du Biogeco ont pu comparer les qualités des pins naturels et sélectionnés. « *Leurs capacités de résistance sont les mêmes,* se réjouit Sylvain Delzon. *La recherche d'une croissance plus rapide a conduit à sélectionner par un heureux hasard des arbres qui avaient un système de transport de sève le plus performant.* »

Les pins sont aujourd'hui coupés à l'âge de 45 ans, contre 60 ans au sortir de la Seconde Guerre mondiale.

La hausse des températures devrait cependant amener le pin à la limite de ses capacités physiologiques. Aussi, les chercheurs préparent la plante à affronter un climat plus chaud et sec. Ils ont donc été chercher en Espagne, au Portugal et au Maroc des graines d'arbres déjà confrontés à des étés longs et caniculaires. « *Deux populations, l'une en Catalogne, l'autre à Leiria au Portugal, montrent des capacités supérieures aux autres* », révèle Sylvain Delzon. En 2022, deux jeunes chercheurs, Thomas Caignard et Deborah Corso, ont ainsi planté plus de 400 pins de sept provenances différentes sur le site de l'ancien Observatoire aquitain des sciences de l'Univers à Floirac, dans la banlieue de Bordeaux, auxquels son propriétaire, l'université de Bordeaux, cherche une nouvelle destination. « *Nous allons étudier la croissance de ces pins, notamment leur système vasculaire,* explique Deborah Corso. *Tout le site sera d'ailleurs consacré à la réponse des arbres aux sécheresses et à leur résistance à l'embolie.* » Un appareillage déjà en place sur des chênes mesure les contractions des troncs lorsqu'il fait sec, leur gonflement lorsqu'il pleut, « *perceptible même sur 24 heures entre l'humidité de la nuit et l'ardeur du soleil le jour* », assure Deborah Corso.



R.SEGURA - BIOGECO - INRAE

La combinaison de plusieurs espèces (pins, bouleaux, chênes…) augmente la biomasse et le carbone stocké tout en réduisant les attaques de ravageurs (ici à Cestas, Gironde).

Un rôle d'atténuation du changement climatique

Ces études menées sur la « respiration » des arbres prennent un tour crucial. Les espèces invasives d'insectes comme le scolyte tuent des forêts entières à la façon d'une « *tempête silencieuse* », ainsi que l'expriment les forestiers. Les sécheresses, quant à elles, épuisent les arbres et les rendent plus sensibles au feu, si bien que le puits de carbone que représentait la forêt peine à garder son rôle d'atténuation du changement climatique. Ainsi, l'arbre a une vie longue qui lui donne une place singulière dans le temps climatique. Les pins plantés aujourd'hui en Aquitaine seront récoltés autour de 2070, sous un climat plus chaud de 2 à 3 °C. Ils seront alors plus exposés aux incendies et aux tempêtes. Les feux de Landiras de 2022 doivent donc être considérés comme de sévères avertissements. ■

Loïc Chauveau @Loïc_Chauveau

Sous la mer, des prairies veillent sur la planète

Les herbiers marins jouent un rôle fondamental pour le climat, stockant jusqu'à sept fois plus de carbone que les sols forestiers… Tel un brise-lames, ils limitent aussi fortement l'érosion des côtes. Leur protection est devenue une urgence.

Le plus grand organisme de la planète connu à ce jour est… un herbier marin ! Découvert en juin 2022 par des océanographes de l'École des sciences biologiques de l'université d'Australie-Occidentale, il couvre 200 km² au large des côtes australiennes, dans la baie Shark. Soit deux fois la taille de Paris ! L'analyse génétique a révélé que l'herbier n'était qu'une seule et même plante incapable de se reproduire de manière sexuée et qui se clone continuellement depuis 4500 ans grâce à un réseau de racines ramifiées. Curiosité de la nature ? Bien au contraire, ce regroupement de plantes à fleurs sous-marines, que l'on appelle herbier marin tant ses feuilles peuvent être longues et étroites, a colonisé toutes les mers et les océans du globe : zones froides, tempérées, tropicales… excepté en Antarctique. « *On estime à plus de 320 000 km² la superficie des herbiers dans le monde, ce qui en fait un des habitats côtiers les plus répandus de la planète, surpassant notamment les récifs coralliens* », note Fanny Kerninon, post-doctorante à l'université de Bretagne occidentale et coordonnatrice du réseau herbiers de l'Initiative française pour les récifs coralliens.

Les plongeurs en Méditerranée les connaissent bien. « *Les phanérogames marines ressemblent à des graminées. Quand on les regarde, on voit des herbes !* », témoigne Christine Pergent, docteure en écologie marine et responsable de l'équipe Écosystèmes littoraux à l'université de Corse. Souvent confondues avec des algues, elles en sont pourtant très distinctes. « *Les plantes à fleurs ont des organes bien constitués et bien différenciés avec des racines souterraines, des tiges et des fleurs. Les algues n'ont ni racine, ni tige, ni feuille, et n'ont pas non plus d'organe de reproduction* », clarifie Christine Pergent.

Les phanérogames marines ressemblent en tout point à leurs ancêtres, les plantes à fleurs terrestres, mais elles se sont adaptées au milieu salin, il y a 100 millions d'années. Malgré une présence quasi planétaire, elles forment un habitat naturel encore peu connu. Mais leur importance écologique est fondamentale. « *Certaines espèces d'herbiers assez robustes et denses stockent énormément de carbone* », assure Fanny Kerninon. Dans une étude publiée en septembre 2022, Christine Pergent et son équipe ont ainsi estimé que les herbiers de posidonie situés sur la côte

FANNY KERNINON

« On estime à plus de 320 000 km² la superficie des herbiers dans le monde, surpassant les récifs coralliens »

Fanny Kerninon, post-doctorante à l'université de Bretagne occidentale

A. MUSTARD/NATUREPL/EBPHOTO ; A. LEYDET/ Nat URAGENCY ; T. WU/ NATUREPL/EBPHOTO ; A. MUSTARD/NATUREPL/EBPHOTO

Les plantes à fleurs marines (en haut, « zostera marina » dans la Manche ; en bas à gauche, posidonie de Méditerranée) sont des refuges de biodiversité : une femelle calmar pygmée dépose ses œufs sur une tige (au centre) ; un hippocampe moucheté s'y abrite (à droite).

est de la Corse stockaient en moyenne 327 tonnes de carbone par hectare. Entre trois à sept fois plus que les sols forestiers ! Le carbone est piégé dans un édifice souterrain, la « matte », qui peut mesurer plusieurs mètres d'épaisseur et atteindre l'âge de 4000 ans par endroits. Pour cette extraordinaire capacité de capture du CO_2, les herbiers de posidonie ont fait l'objet d'un projet de compensation carbone, « Prométhée Med », lancé en mars 2021, auquel Sandrine Ruitton, maître de conférences à l'Institut méditerranéen d'océanologie de Marseille, a participé avec les chercheurs de l'université de Corse. La scientifique a élaboré avec son équipe une méthodologie pour calculer le gain, en matière de carbone stocké, de la protection des herbiers de posidonie de la façade méditerranéenne. « *Nous venons d'estimer que la posidonie était implantée sur près de 80 000 hectares. La protection de ces sites représente donc un stockage de carbone potentiellement considérable.* »

Les herbiers sont aussi essentiels à la biodiversité : « *De nombreuses espèces de poissons méditerranéens viennent s'y nourrir et se reproduire. Les juvéniles peuvent se cacher entre les feuilles, les racines et les tiges et grandir tranquillement* », témoigne Sandrine Ruitton. Poissons, mais aussi oursins, mollusques, crabes, gorgones… La vie foisonne au sein de ces prairies sous-marines.

Une protection naturelle des littoraux

Cet écosystème permet par la même occasion de soutenir la pêche locale. En juin 2022, une équipe de scientifiques suédois de l'université de Stockholm a montré que les herbiers marins constituaient un filet de sécurité fiable pour des pêcheurs venant de toute la région indopacifique. Encore plus que la pêche sur les récifs coralliens, les herbiers marins permettent en effet de faire vivre des millions de ménages en fournissant des prises importantes de poissons et d'autres animaux.

Autre service écosystémique, moins visible mais tout aussi important : les herbiers marins atténuent la houle tel un brise-lames et limitent fortement l'érosion des côtes. « *Lorsque le sable arrive entre les feuilles de posidonie, il tombe sur le fond, sédimente et finit piégé au pied des herbiers. Il ne sera pas remis en suspension en cas de houle, contrairement à une étendue de sable sans protection qui serait fortement remuée* », affirme Sandrine Ruitton. En novembre 2022, des biologistes marins de l'université de Göteborg, en Suède, ont découvert que le tapis racinaire des herbiers marins *(Zostera marina)* lie les dunes de sables sous-marines entre elles et réduit l'érosion des falaises jusqu'à 70 %. Cette pro-

RESTAURATION

Comment sauver les herbiers

Récupérer les graines des phanérogames marines. C'est le point de départ d'une expérience conduite en Australie pour restaurer les herbiers. L'objectif est de les ensemencer dans un nouveau milieu naturel. Mais cette méthode est aussi compliquée qu'onéreuse. Toutes les espèces n'ont pas les mêmes chances de restauration et la réussite des opérations dépend beaucoup des conditions environnementales. Elle prend également beaucoup de temps : « *Pour la posidonie, nous arrivons au mieux à transplanter des individus et donc à créer une miniplantation d'herbier. En général cela demande au minimum une dizaine d'années pour avoir une surface intéressante, car cette espèce pousse très lentement : de 0,1 à 1 mètre tous les 100 ans* », constate Christine Pergent.

Lorsqu'elle est affectée par les activités humaines, sa récupération naturelle est donc hypothétique. De plus, sur le long terme, il n'est pas efficace de tenter de restaurer un herbier dans un milieu dégradé si les causes de la dégradation du milieu n'ont pas disparu. « *Renforcer la préservation de ces milieux est bien plus recommandé* », conclut Fanny Kerninon.

S. GROSS/ NATUREPL/ EBPHOTO

Des zostères (« Zostera marina ») sont versées dans ces cuves en vue d'un ensemencement ultérieur par des chercheurs de Virginie (États-Unis, 2019).

tection côtière naturelle est donc un allié de taille pour faire face aux effets du dérèglement climatique. Même les feuilles mortes ont un rôle à jouer grâce à la « banquette » qu'elles forment sur les plages : « *Chaque année, les feuilles de posidonie viennent s'échouer sur la plage. Elles s'accumulent et forment une sorte de matelas qui protège les plages de l'érosion en y maintenant le sable. C'est une protection naturelle gratuite* », soutient Sandrine Ruitton.

En dépit de tous ces services qu'ils rendent et de leur valeur patrimoniale, des travaux récents montrent que les herbiers ont globalement décliné en quelques décennies. La présence de ces phanérogames marines à de faibles profondeurs les rend particulièrement sensibles et fragiles aux activités humaines : « *La posidonie était particulièrement menacée dans les années 1980 avec les aménagements littoraux qui ont détruit de nombreux herbiers par ensevelissement,* déclare Sandrine Ruitton. *Ils ont fortement régressé à cette période. Puis il y a eu une prise de conscience. Depuis, ils ont été protégés et les aménagements littoraux ont été quasiment stoppés.* »

La posidonie toujours menacée par le chalutage de fond

Mais dans les Caraïbes, les herbiers natifs déjà menacés par les cyclones se font progressivement remplacer par une espèce beaucoup moins « intéressante » sur le plan écologique : *Halophila stipulacea*. « *Cette espèce exotique envahissante, originaire de la mer Rouge, stocke moins de carbone que les herbiers natifs* », déplore Fanny Kerninon. En France, la posidonie est protégée depuis 1988. Elle n'en reste pas moins directement menacée par le chalutage de fond et le mouillage des navires : l'ancre des bateaux peut détruire les herbiers mais aussi arracher la précieuse matte et provoquer la libération de stocks importants de carbone. Pour éviter ce phénomène, des arrêtés de 2021 établissent des zones d'interdiction de mouillage sur toute la façade méditerranéenne pour les navires de plaisance de plus de 24 mètres. Ces bateaux doivent désormais jeter l'ancre dans des zones spécifiques, sans risques pour la posidonie. Ils peuvent également s'amarrer dans des zones de mouillage réservées avec des ancrages fixes au fond et des bouées en surface. ■ **Sophie Vanel**

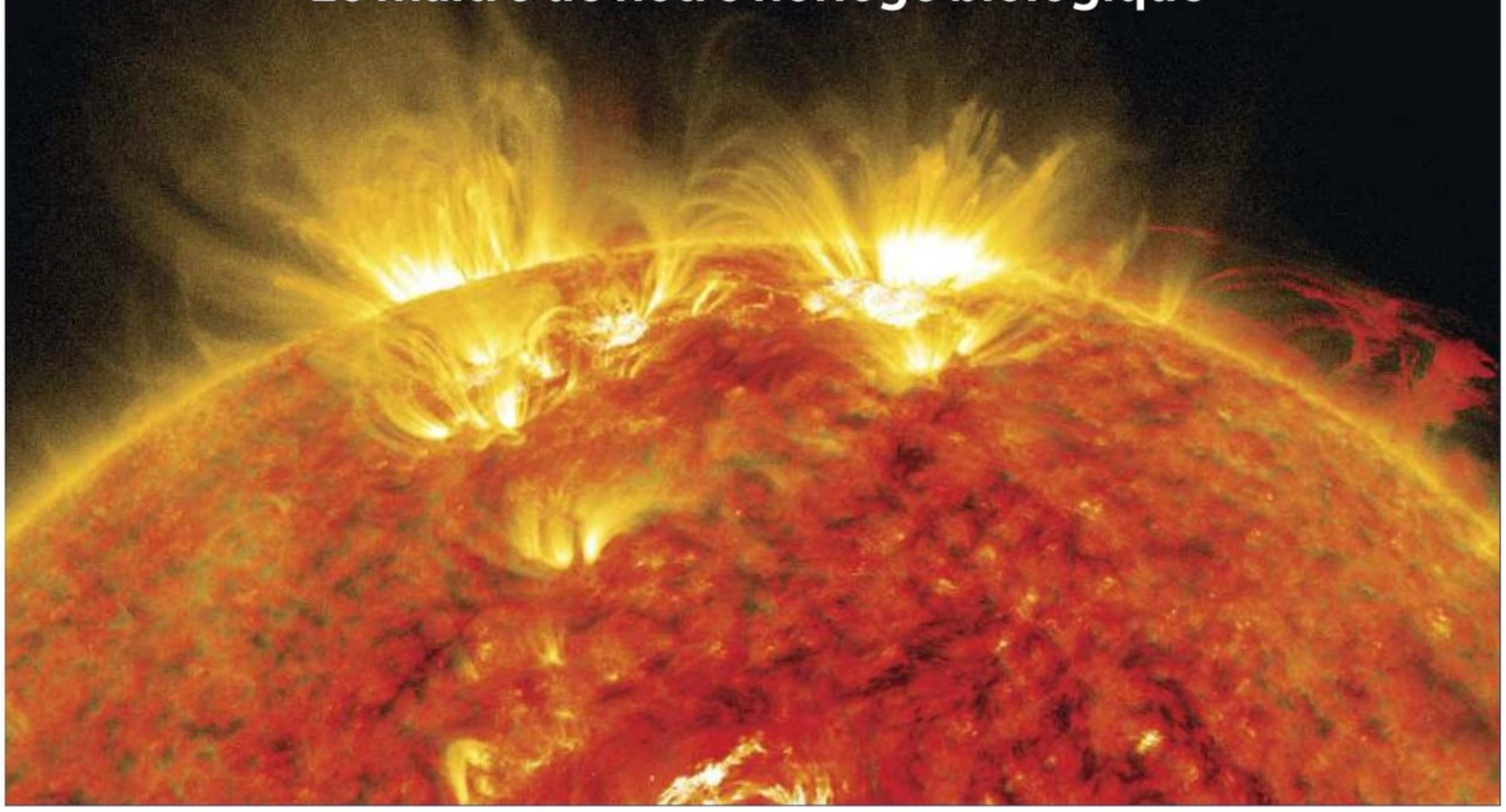
LES INDISPENSABLES

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

ROLAND LEHOUCQ
Astrophysicien au CEA
« Notre étoile est un objet physique incroyablement subtil ! »

LE SOLEIL

Les mystères de sa couronne dévoilés
À l'origine de toute vie
L'avenir du photovoltaïque s'invente en Savoie
Le maître de notre horloge biologique



BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR ; NASA

en vente en kiosque

Nutri-score

Le défi des aliments ultratransformés

Dix ans après sa conception, l'indicateur nutritionnel affine son algorithme pour donner une information encore plus fiable aux consommateurs. Mais les chercheurs peinent à sélectionner les critères servant à définir les aliments ultratransformés néfastes pour la santé.

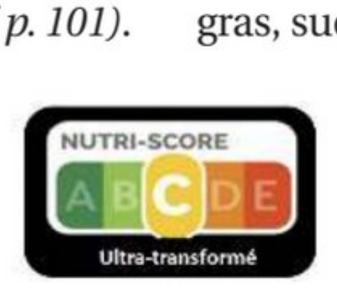
Par Isabelle do O'Gomes

© BURGER / PHANIE

On ne présente plus le Nutri-score : 95 % des adultes français et 97 % des adolescents en ont déjà entendu parler, et plus de 700 entreprises, représentant 57 % des parts de marché en volume de vente, l'affichent sur leurs produits, selon le ministère de la Santé et de la Prévention. Dix ans après sa conception, il s'apprête à faire peau neuve avec des scores établis par de nouveaux algorithmes *(lire l'encadré p. 101)*. Mais il ne prendra toujours pas en compte l'« ultratransformation » des aliments.

C'est au sein de l'université de São Paolo au Brésil, sous la direction de l'épidémiologiste Carlos Monteiro, qu'a émergé ce concept au début des années 2000. *« Nous avons observé que les Brésiliens achetaient moins de sucre et moins d'huile, consommaient moins d'aliments traditionnels comme le riz et les haricots, et beaucoup plus de produits prêts à manger,* raconte l'épidémiologiste. *Et si la faim continuait à sévir au Brésil, la part de personnes obèses augmentait parallèlement.* » Le scientifique dresse alors un constat : si les Brésiliens achètent moins de sucre ou d'huile, ils en consomment bien plus à travers des en-cas, des céréales au petit déjeuner, des biscuits ou des snacks.

Une observation qui a conduit son équipe à publier dès 2009, dans la revue *Public Health Nutrition*, un article invitant à revoir les recommandations de santé publique : arrêter de se focaliser uniquement sur la qualité nutritionnelle des aliments (riches en fibres, en vitamines, gras, sucrés, salés, caloriques), pour s'intéresser à la façon dont ils ont été transformés. Les chercheurs donnent alors une première définition de l'ultratransformation : des produits industriels réalisés à partir de nombreux ingrédients que l'on ne trouve pas dans une cuisine *(lire l'encadré p. 100)*. *« Préparer des repas traditionnels nécessite d'acheter des aliments bruts comme des haricots rouges, de la viande, des œufs, du sucre,* explique Carlos Monteiro. *Or, si les entreprises doivent fabriquer ces plats industriellement, et qu'ils trouvent sur le marché des substances extraites d'aliments moins chers que les aliments bruts, ils les* ▶



Prototype de logo intégrant la présence d'aliments ultratransformés.

▲ **Non obligatoire,** le Nutri-score est apposé par les entreprises sur leurs produits de manière discrétionnaire. En France, elles sont un peu plus de 700 à être engagées dans cette démarche.

achètent. Ainsi, ils remplacent la viande par du "minerai de viande" (chutes de viande agglomérées pour reconstituer de la viande) ou le sucre de canne par du fructose de maïs. On trouve dans les supermarchés des produits ne contenant aucun aliment brut. De plus, comme toutes ces substances assemblées entre elles n'ont ni le goût, ni la texture, ni la couleur d'un plat traditionnel, ils leur ajoutent des additifs : arômes, colorants, émulsifiants. » Et, selon lui, c'est bien cette ultratransformation industrielle qui est responsable du développement des épidémies de maladies chroniques de type diabète ou obésité. Car, en outre, ces produits sont souvent très gras, très sucrés, très caloriques.

FELIX CLAY/FINANCIAL TIMES-REA

Arômes, émulsifiants et colorants offrent goût, texture et couleur aux plats industriels ne contenant aucun aliment brut.

Une altération de la santé mise en évidence

Le constat de l'équipe brésilienne est vite partagé, notamment par des épidémiologistes. À partir de 2015, des études fondées sur le suivi de grandes cohortes de participants durant plusieurs années confirment le travail du laboratoire de Carlos Monteiro : la consommation quotidienne d'aliments ultratransformés est associée à des maladies chroniques, à une mauvaise santé cardiaque, ou encore à une augmentation de cancers. Autre enseignement : quelles que soient les traditions culinaires d'un pays, la substitution des repas traditionnels par des repas à base d'ultratransformés altère la santé.

Parallèlement, d'autres travaux menés sur les mécanismes physiologiques conduisent à de tels résultats. Benoît Chassaing, chercheur Inserm à l'Institut Cochin, a ainsi montré que les émulsifiants, très fréquents dans la composition des aliments ultratransformés, augmentent la perméabilité de la paroi intestinale et provoquent un état d'inflammation chronique dans l'organisme. Anthony Fardet, chercheur à l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), a quant à lui développé le concept de « matrice alimentaire dégradée et artificielle » : « *Les aliments à matrice artificielle sont créés de toutes pièces par les industriels. Le lait végétal, le steak végétal, les barres chocolatées, les bonbons ou encore les sodas en sont des illustrations. Ces produits sont avant tout des assemblages de sous-produits de la fragmentation* (cracking) *du lait, des œufs, des céréales (maïs, riz, blé), du pois, du soja ou de "minerais de viande". On assemble ainsi du sirop de glucose, des isolats de gluten, de la gélatine (issue du collagène), des protéines de pois, des isolats de fibres, pour former un nouvel aliment.* » Mais cette matrice artificielle modifie les interactions entre les différents nutriments (glucides, lipides, vitamines…) qui composent un aliment. « *Les glucides, des féculents ultratransformés, en particulier, seront absorbés plus rapidement par l'organisme. Or, celui-ci est programmé pour une libération progressive des sucres. Si elle est trop rapide, il y aura montée en flèche de la glycémie, c'est-à-dire du taux de sucre dans le sang, avec des conséquences à long terme comme le développement de pathologies telles que le diabète de type 2* », précise Anthony Fardet.

Des réflexes de satiété et de régulation alimentaire inhibés

En 2019, les National Institutes of Health (NIH) — les institutions publiques de recherche en matière de santé aux États-Unis — ont publié une étude majeure. Deux groupes de personnes ont été isolés dans un hôpital : au premier a été proposée une alimentation où plus de 80 % des calories provenaient d'aliments ultratransformés, tandis que le second a reçu des repas sans aucun produit ultratransformé. Chaque participant mangeait selon sa faim. Au bout de deux semaines, les scientifiques ont constaté que les participants du premier groupe mangeaient 3000 calories par jour et qu'ils avaient pris du poids (presque un kilo) ; dans le second groupe, les participants ne consommaient en moyenne que 2500 calories et avaient perdu du poids (un kilo). « *Cette expérience démontre que ces produits à faible valeur nutritionnelle inhibent nos réflexes de satiété et de régulation alimentaire,* commente Carlos Monteiro. *Ces aliments ont profondément modifié les régimes alimentaires aux États-Unis,* ▸

DÉFINITIONS

Les quatre marqueurs de l'ultratransformation

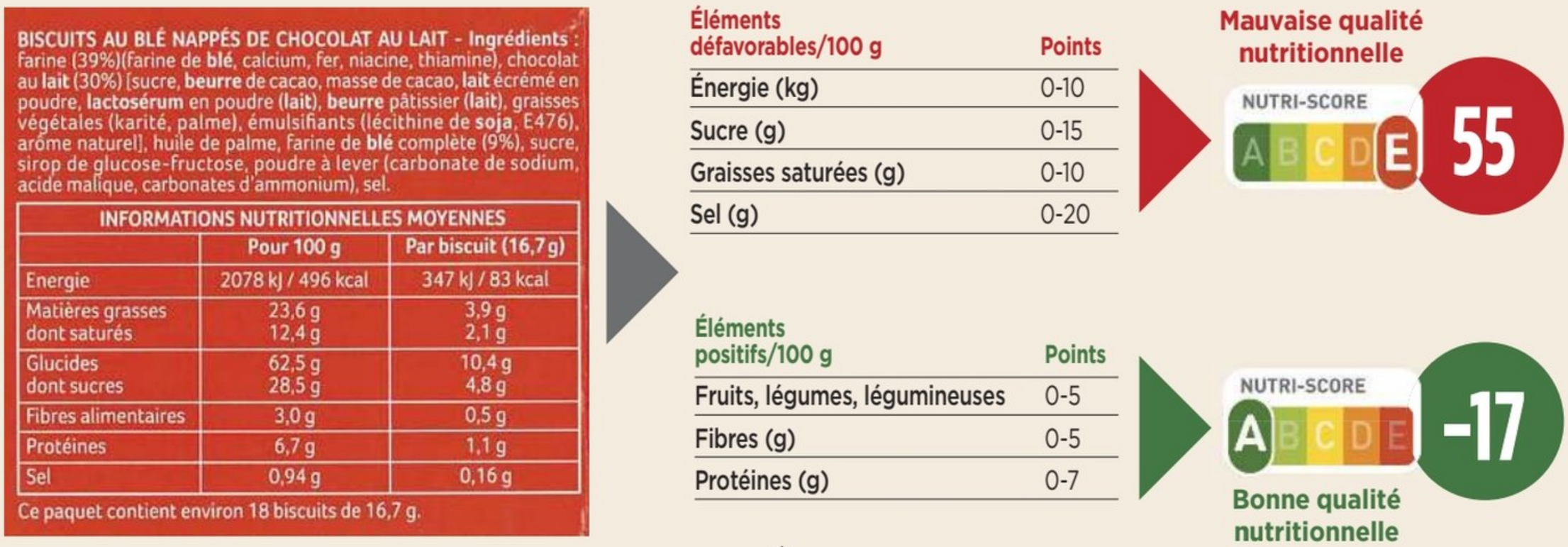
Définis par le chercheur Anthony Fardet à partir de la classification Nova de Carlos Monteiro, les quatre marqueurs de l'ultratransformation sont :

- **Les additifs cosmétiques** (colorants, texturants et modificateurs de goût).
- **Les arômes.**
- **Certaines techniques** de transformation industrielle drastiques (soufflage, hydrogénation, cuisson-extrusion…).
- **Les glucides, lipides, protéines et fibres ultratransformés,** généralement issus du *cracking* alimentaire (huiles hydrogénées, amidons modifiés, gluten, protéines de lait, isolats de fibres…).

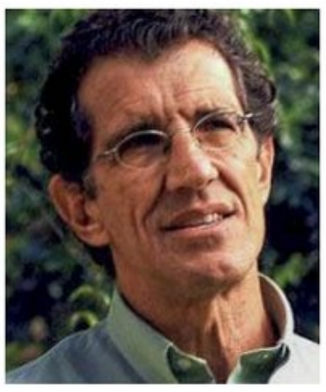
ÉLABORATION

Comment fonctionne le Nutri-score

Le Nutri-score est né en 2013 à l'initiative du nutritionniste et épidémiologiste français Serge Hercberg, alors président du Programme national nutrition santé (PNNS). Objectif : à partir des informations nutritionnelles obligatoires présentes sur les emballages des aliments, créer un algorithme qui les classe en cinq catégories, de A à E. L'idée est, d'une part, d'aider les Français à choisir des aliments plus sains, d'autre part, de faire pression sur les industriels pour qu'ils revoient la formulation de leurs produits s'ils sont mal notés. Le premier algorithme, dévoilé en 2017, reposait sur ce constat : une alimentation trop salée, trop sucrée, trop riche en acides gras saturés (beurre…), trop calorique et trop pauvre en fibres (pas assez de légumes, de fruits ou de légumineuses) est un terreau pour le développement de maladies métaboliques comme le diabète, certains cancers et maladies cardio-vasculaires. Depuis, les travaux de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) et du Haut Conseil de la santé publique, entre autres, ont confirmé la nécessité de diminuer de façon plus significative encore la consommation de sucre, de sel, de graisses saturées, et d'augmenter celle de céréales complètes, de nutriments comme le calcium et le fer. Un comité scientifique transnational, constitué de 12 scientifiques représentant la France et six autres pays européens ayant eux aussi adopté le Nutri-score (Allemagne, Belgique, Espagne, Luxembourg, Pays-Bas et Suisse), est chargé de faire évoluer l'algorithme. En juin 2022, le comité a ainsi voté un nouvel algorithme pour les aliments solides. Ceux-ci sont désormais plus sévèrement notés s'ils sont trop salés ou trop sucrés, favorisés s'ils sont riches en protéines et peuvent obtenir des points bonus s'ils contiennent beaucoup de fibres. De même, en février dernier, l'algorithme qui donne le score aux boissons a été repensé pour inciter les industriels à réduire la quantité de sucre tout en évitant qu'il soit remplacé par des édulcorants. Conséquences : il va devenir difficile de trouver des céréales pour le petit déjeuner avec un Nutri-score A ou B ; la plupart des pains blancs auront un score C ; les charcuteries et les fromages très salés seront aussi pénalisés et les sodas à l'aspartame ne pourront plus obtenir un score B.



À partir des informations nutritionnelles obligatoires sur le produit, l'industriel calcule son Nutri-score : trop de sucres, c'est jusqu'à 15 points de plus ; trop de sel, 20 points supplémentaires… Une fois la somme des éléments défavorables effectuée, il peut soustraire 5 points maximum si le produit contient beaucoup de fibres, 7 points s'il comprend des protéines, etc.


UNIVERSITY OF SÃO PAULO

« Les aliments ultratransformés représentent en France 30 % des aliments consommés, surtout entre les repas »

Carlos Monteiro, épidémiologiste à l'université de São Paulo, Brésil

en Angleterre ou en Australie. Une transition alimentaire s'est opérée dans ces pays où les aliments ultratransformés apportent plus de 60 % des calories d'un repas. Concrètement, cela veut dire que dans une famille américaine, on mange de moins en moins à table autour d'un repas unique, frais et préparé à la maison : chacun se sert en surgelés, en plats industriels et le micro-ondes remplace le four et la plaque de cuisson. Conséquence : une épidémie d'obésité et de diabète de type 2. » En ce qui concerne la France, l'épidémiologiste brésilien fait un constat plus nuancé : « *Les produits ultratransformés y représentent 30 % des aliments consommés surtout sous forme de snack entre les repas, pour le goûter par exemple, ou sous forme de boisson ou de dessert. Comme ils ne font pas partie du régime alimentaire de base, il y a des leviers d'action pour empêcher cette transition.* »

Tous les additifs ne sont pas à mettre sur le même plan

Comment intégrer ces résultats au Nutri-score pour inverser la tendance ? Lors de la conception de celui-ci, les travaux sur l'ultratransformation des produits alimentaires étaient encore balbutiants. Maintenant que les preuves de leurs effets néfastes sur la santé abondent, les scientifiques de l'équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle (Inserm/Inra/Cnam/université Sorbonne Paris Nord) à l'origine du Nutri-score réfléchissent à une évolution du logo. C'est que, selon une étude dirigée par Serge Hercberg au sein de la même équipe, 8 % des aliments ayant un Nutri-score A et 13 % des produits décrochant la note B sont ultratransformés.

Mais la tâche est complexe : faut-il considérer un aliment ultratransformé comme mauvais dès qu'il y a un arôme dans sa composition ? Dès qu'il y a un additif ? Toutes les substances industrielles obtenues par fragmentation sont-elles délétères pour la santé ? Existe-t-il des types de transformation industrielle des aliments sans danger ? « *Pour une utilisation à des fins d'étiquetage, le défi consiste à décider, dans l'état actuel des connaissances, ce qui doit être considéré "à coup sûr" comme un marqueur d'ultratransformation,* précise Mathilde Touvier, directrice de recherche à l'Inserm, responsable de l'équipe qui travaille sur cette adaptation du Nutri-score. *Si les recherches sont toujours en cours, les premiers éléments laissent penser que tous les additifs, toutes les substances industrielles et toutes les méthodes de transformation ne se valent pas en matière d'impact sur la santé.* » Se pose en particulier la question des additifs. « *L'Europe en autorise environ 330. Il n'est pas judicieux de mettre sur le même plan l'acide ascorbique ou vitamine C (E300) et les nitrites (E249 et E 250), qui viennent d'être reconnus comme facteurs de risque de cancer colorectal par l'Anses* », poursuit l'épidémiologiste.

Quand un nouveau logo sera-t-il proposé ? Mathilde Touvier reste prudente : « *La communauté scientifique a encore besoin de temps pour rendre sûrs, et surtout inattaquables, les critères servant à définir les aliments ultratransformés néfastes pour la santé.* » En attendant, il reste à voir comment consommateurs et industriels vont répondre aux étiquetages de Nutri-score dictés par les nouveaux algorithmes. Ceux-ci sont « *très informatifs sur la qualité nutritionnelle des aliments, et pourraient déjà être adoptés par l'Europe en l'état actuel* », estime la chercheuse. ■

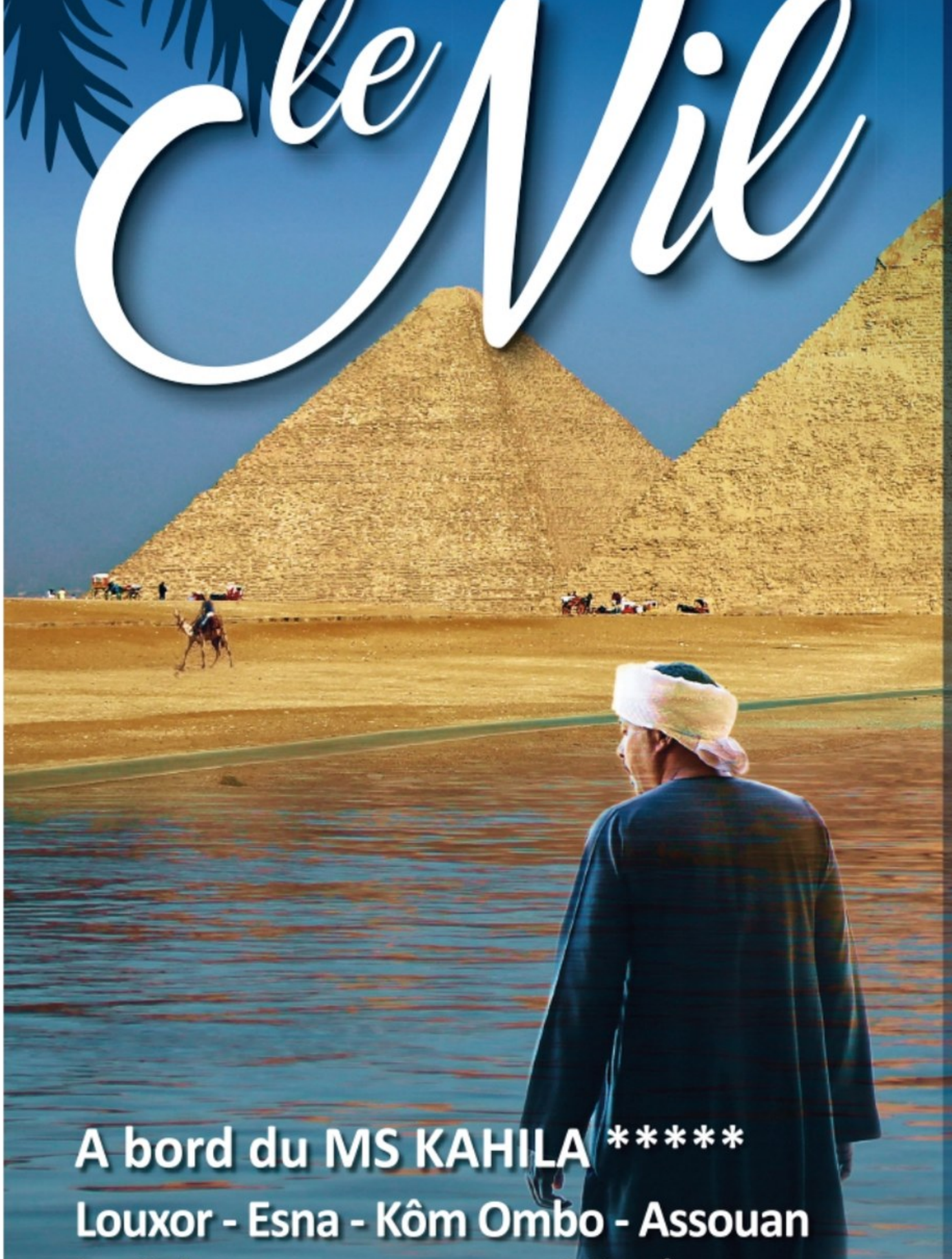
PRODUITS VÉGANS

Sans viande mais ultratransformés

Passés à la loupe, les produits végans sont l'archétype de l'aliment ultra-transformé. Ainsi, un lard sans viande comprend deux substances industrielles (protéines de soja et amidon de tapioca), trois additifs (E401 : alginate de sodium, E163 : anthocyane, E160 : lycopène) et des arômes ; soit six marqueurs de l'ultratransformation sur dix ingrédients. En effet, l'offre de l'industrie agroalimentaire permet aux végétaliens d'introduire dans les préparations culinaires des substituts aux produits carnés et laitiers présents dans les recettes traditionnelles. Or, ces succédanés sont presque tous ultratransformés. L'épidémiologiste Benjamin Allès, chargé de recherche à l'Inrae, a montré que certains végétaliens consommaient plus d'aliments ultratransformés que les omnivores. Il estime que le développement du marché des substituts de viande et de produits laitiers contribue à la consommation croissante de produits ultratransformés.

DU 22 AU 30 NOV. 2023

CROISIÈRE SUR le Nil



A bord du MS KAHILA *****

Louxor - Esna - Kôm Ombo - Assouan
Le Caire et son nouveau Musée

9 JOURS / 8 NUITS

A PARTIR DE **2 790 €/PERS. EN TOUT INCLUS** (1)

AVEC LA PARTICIPATION DE (2)
PASCAL VERNUS, Egyptologue
CHRISTIAN GRATALOUP, Géohistorien
YASMINE FOUAD, Ministre de l'environnement
DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de SCIENCES et AVENIR

MAGIQUE EGYPTE

Amis de Sciences et Avenir et de La Recherche, songez que, du haut de ces pyramides, quarante siècles d'histoire vous contempleront ! Il n'est même pas besoin de paraphraser la déclaration de Bonaparte à ses soldats pour rappeler la fascination que la civilisation égyptienne continue d'exercer sur notre imaginaire.

Hiéroglyphes, Champollion, momies, Kheops, Toutankhamon, Akhenaton, Nefertiti... tous ces noms continuent d'avoir pour nous une résonance fabuleuse.

Le voyage de huit jours à l'automne 2023 - en compagnie de deux scientifiques français exceptionnels que les lecteurs de Sciences et Avenir - La Recherche connaissent bien, l'égyptologue **Pascal Vernus** et le géo-historien **Christian Grataloup** - permettra de découvrir (ou redécouvrir) les pyramides de Gizeh et le Sphinx, mais aussi le grand musée du Caire. Ce plus vaste musée d'égyptologie au monde abritera désormais les joyaux telles la collection complète du trésor de Toutankhamon, l'immense barque solaire du pharaon Kheops et pas moins de 100.000 antiquités traduisant l'imaginaire envoûtant des Egyptiens, toujours à la conquête de l'immortalité. A partir de Louxor, nous aurons ensuite le plaisir de voguer pendant quatre jours sur ce fleuve nourricier qu'est le Nil, dont les crues ont été la clé du développement de cette civilisation dans une zone aride. Et pourrons visiter des lieux aussi mythiques que la vallée des Rois, le temple de Hatchepsout mais aussi Abou Simbel, dont le sauvetage des deux temples fut la plus grande opération archéologique du XXe siècle. **Embarquez donc avec nous pour un voyage qui promet des moments magiques !**

Dr Dominique Leglu
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-egypte.fr
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Premier remède éprouvé contre le hoquet

Les origines de ce « hic » sonore, irrépressible et répétitif mettent toujours au défi les médecins. Mais un neurologue américain a développé un dispositif original destiné aux personnes atteintes de hoquet chronique, causé le plus souvent par un reflux gastro-œsophagien. Explications.

Son utilité n'est pas toujours comprise mais nous le partageons avec tous les vertébrés. C'est le hoquet, cette contraction involontaire spasmodique et coordonnée des muscles inspiratoires dont on ne sait jamais très bien quand elle démarre ni combien de temps elle va durer. Pour le faire céder, nombreux sont les remèdes populaires parfois très insolites : boire un verre d'eau à l'envers, bloquer sa respiration, faire fondre un glaçon sur son nombril, rencontrer un horrible monstre pour sursauter… Autant de solutions empiriques dont l'efficacité demeure difficilement vérifiable. Or, depuis peu, un dispositif a été homologué aux États-Unis comme premier traitement du hoquet. Hiccaway est un objet rigide en forme de L, une paille astucieuse mise au point par le Dr Ali Seifi, neurologue à l'université du Texas. « *En 2015, j'ai été confronté aux questions de l'un de mes patients qui, à la suite d'une intervention cérébrale, a développé un hoquet comme effet secondaire. Il m'a demandé pourquoi il n'y avait pas encore à ce jour de traitement efficace. Cela m'a donné envie de comprendre et depuis, j'ai développé ce dispositif* », explique le neurologue qui a dû convaincre certains de ses collègues quelque peu sceptiques de l'intérêt de ces recherches.

Nul doute que Charles Osborne (1893-1991), détenteur du triste record mondial du plus sévère hoquet rapporté à ce jour, eut apprécié en disposer. Ce paysan de l'Iowa a hoqueté 30 fois par minute pendant 68 ans (soit 400 millions de fois au total !), son hoquet ayant démarré et disparu sans qu'aucune cause n'ait à l'époque été trouvée.

Pour bien comprendre les travaux d'Ali Seifi, il faut faire un petit détour par la physiologie du hoquet. Les médecins préfèrent parler de « myoclonie phréno-glottique », en clair d'un mécanisme sous l'influence de différents muscles (diaphragme, muscles intercostaux) impliqués dans l'inspiration et innervés par le nerf vague et le nerf phrénique. Ce réflexe involontaire découle d'une contraction brutale et coordonnée de ces muscles, rapidement suivie par la fermeture au niveau des voies aériennes supérieures de la glotte, une structure proche des cordes vocales. C'est elle qui, en se fermant sous l'effet de l'augmentation de la pression d'air, produit

NÉONATOLOGIE

Hoqueter pour mieux respirer

De récentes observations suggèrent que le hoquet permet au bébé d'apprendre très tôt à réguler sa respiration, et joue peut-être un rôle important dans le développement cérébral. L'hypothèse a été formulée dans des travaux britanniques, publiés en 2019 dans la revue *Clinical Physiology,* durant lesquels 13 nouveau-nés, prématurés ou nés à terme atteints de hoquet avaient été suivis au sein d'un service de néonatologie. Leur activité cérébrale avait été enregistrée par un électroencéphalogramme et des capteurs de mouvements positionnés sur leur torse pour repérer le moment précis des hoquets. Les chercheurs se sont rendu compte que les contractions diaphragmatiques étaient contemporaines d'ondes cérébrales particulières traduisant une hyperactivité au niveau du cortex cérébral.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Testée sur 249 volontaires atteints de hoquet chronique, la paille d'Hiccaway a fait cesser les sursauts chez 92 % d'entre eux.

le fameux « hic », sonore, irrépressible et parfois très gênant. Mais les voies cérébrales du contrôle du hoquet restent à ce jour mal connues.

Heureusement, il est le plus souvent bénin et dure moins de quarante-huit heures, tout simplement provoqué par un repas ingéré trop vite, en lien avec le gonflement de l'estomac pesant alors mécaniquement sur le diaphragme. Parfois, il peut être dû à certains médicaments (anti-inflammatoires de la famille des corticoïdes, antibiotiques, antalgiques, anticancéreux, opiacés, benzodiazépines, agonistes de la dopamine) et cesse à l'arrêt du traitement. Dans d'autres cas cependant, il peut devenir chronique (plus de quarante-huit heures) et nécessite un avis médical, car il traduit le plus souvent une complication sous-jacente : tumeur locale comprimant le diaphragme, maladie neurologique ou pulmonaire… Les médecins peuvent alors prescrire certaines molécules (oméprazole, chlorpromazine, gabapentine…) qui détendent les muscles et modifient la réactivité des nerfs.

ALI SEIFI

« La soupape de pression induit une aspiration forcée et c'est l'effort de contraction qui permet de débloquer le diaphragme »

Ali Seifi, neurologue à l'université du Texas, États-Unis

Des volontaires pour un nouvel essai clinique

La paille d'Ali Seifi est, elle, plutôt destinée aux personnes atteintes de hoquet chronique non grave, en lien par exemple avec un reflux gastro-œsophagien. Elle agit de manière purement mécanique. Une fois qu'elle a été positionnée dans un verre d'eau, il s'agit d'aspirer avec force par l'embout buccal pour vider le verre. « *La soupape de pression située à la base induit une aspiration forcée et c'est l'effort de contraction qui permet de débloquer le diaphragme et de retrouver rapidement une vie normale* », explique le spécialiste.

Une première étude parue en 2019 dans la revue *Jama*, menée auprès de 249 volontaires dont plusieurs étaient atteints de hoquet récurrent, a rapporté une efficacité dans plus de 92 % des cas. Depuis, la paille est en vente en ligne (15 euros). Mais en ce début d'été, l'équipe d'Ali Seifi a décidé d'aller encore plus loin pour valider son concept. Un nouvel essai va être mené mais, cette fois, de manière randomisée (avec tirage au sort) et en aveugle. « *Hiccaway sera proposé à la moitié du groupe de volontaires, quand d'autres seront équipés d'une paille factice* », précise le neurologue. Le recrutement d'une cinquantaine de volontaires, sur son site et sur les réseaux sociaux, vient tout juste de démarrer. En attendant, le mieux reste de prévenir le hoquet. Comment ? En s'alimentant dans le calme, avec des repas pas trop copieux ni épicés, et sans boissons gazeuses. ■ **Sylvie Riou-Milliot**

71 %

des Français ont cuisiné au barbecue ou à la plancha en 2022.

SOURCE : SONDAGE BVA, 2022.

Les modes de cuisson sur le gril

Avec les beaux jours, la tentation est grande de sortir le barbecue pour lancer des grillades. Mais ce mode de cuisson, mal maîtrisé, peut être nocif pour la santé. D'autres solutions existent.

À l'étouffée, à la poêle ou au barbecue, la cuisson assure une meilleure digestion des aliments, exalte les saveurs et détruit les micro-organismes. Mais elle peut aussi générer des substances nocives et transforme les aliments qui perdent parfois de leurs qualités nutritionnelles. À chaleur humide (papillote, à l'étouffée, poché…) ou sèche (grillé, rôti, frit…), cap sur les cuissons à limiter et à privilégier.

Le mode de cuisson modifie les aliments

Cuire les aliments entraîne la dégradation de certains de leurs nutriments comme les vitamines, les acides aminés, les glucides. La réaction de Maillard, responsable du brunissement des aliments (beurre, peau du poulet, etc.) et de la formation d'arômes, génère ainsi de nombreux composés dont les produits de glycation avancée ou AGE (Advanced Glycation End products), qui pourraient favoriser les maladies cardio-vasculaires, le diabète ou encore la démence (1). Or dans une même viande, leur teneur varie selon le temps et les modes de cuisson (les « sèches » générant plus d'AGE que les « humides »). Bouilli durant une heure, le blanc de poulet sans peau génère 11 236 unités d'AGE par gramme ; cuit au micro-ondes durant cinq minutes, 15 245 U/g ; rôti au four quarante-cinq minutes, 60 203 U/g ; frit pendant huit minutes 73 896 U/g (2).

Limiter la température de cuisson…

L'acrylamide issu de la réaction entre l'asparagine (un acide aminé) et le glucose se forme lors des cuissons au four, à la poêle, en friture ou au gril (les cuissons vapeur et à l'eau en sont exemptes) dans des aliments riches en amidon comme la pomme de terre (frites, chips)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

RÉACTION DE MAILLARD Amorcée par la réaction d'un sucre (hexose) sur un acide aminé, elle s'accélère sous l'action de la chaleur (plus de 150 °C). Elle génère divers composés (hydroxyméthylfurfural, acrylamide…).

HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP) Substances issues de la combustion incomplète du bois ou du charbon, également formées lors de la torréfaction du café, le séchage des céréales et le fumage des aliments.

POINT DE FUMÉE Température à partir de laquelle les matières grasses se dénaturent, entraînant la formation de molécules volatiles dont l'acroléine, reconnaissable par une fumée et une odeur âcre irritante.

ainsi que le blé (croûte de pain). En 1994, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a classé cette substance comme agent cancérogène avéré pour l'animal et probablement cancérogène pour l'humain (groupe 2A). Pour en limiter la consommation, mieux vaut éviter de trop griller ses tartines, et pour la préparation des frites, limiter la température de l'huile de friture à 180 °C, l'acrylamide se formant plus massivement au-delà.

…et le gril

Cuire sur le gril génère des amines hétérocycliques reconnues comme mutagènes (3) ainsi que des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ces derniers se forment particulièrement lorsque les aliments sont en contact direct avec la flamme ou que des résidus de gras tombent sur le feu du barbecue. Or l'un de ces composés, le benzopyrène, a été classé comme cancérogène avéré pour l'humain par le Circ en 2005 (4). Pour en limiter la formation, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) recommande, entre autres, d'installer la grille au moins à 10 cm de hauteur pour que les aliments soient cuits à la chaleur des braises et non au contact direct des flammes, de recouvrir le foyer d'un léger tapis de cendre, de retirer le gras apparent des viandes ou d'opter pour un modèle de barbecue à cuisson verticale (5). Autre alternative, utiliser une plancha. Elle saisit rapidement les aliments sans contact direct avec la flamme (les graisses sont aussi évacuées par une goulotte) et génère donc moins de composés nocifs. Elle permet aussi de réguler plus facilement la température de cuisson.

Bien choisir ses huiles de cuisson

Rapide et facile, la cuisson à la poêle exige souvent l'apport de graisses. Les acides gras sont particulièrement sensibles à la chaleur et réagissent facilement avec l'oxygène environnant. Il se forme alors des produits de dégradation — les peroxydes lipidiques — responsables du phénomène de rancissement. Cependant, plus une huile est saturée, plus elle reste stable à la chaleur. C'est le cas des huiles d'arachide et de coco (point de fumée de 230 °C), de tournesol (232 °C), de pépins de raisin (216 °C).

Certaines huiles, au contraire, ne doivent pas du tout être chauffées comme celles de noix, d'argan, de lin et de colza. Attention également au beurre bruni, car il génère du N-carboxyméthyllysine (CML), un AGE (6).

Les cuissons douces préservent les vitamines

La pomme de terre cuite à la vapeur conserverait 83 % de sa vitamine C, contre 50 % lorsqu'elle est cuite à l'eau bouillante, selon des travaux coréens (7). De même, la carotte cuite à la vapeur garderait 70 % de ses vitamines C et K et 90 % de sa vitamine E, contre 55 % de vitamine C et 70 % de vitamine E lorsqu'elle est cuite à l'eau. Pour ce qui concerne la cuisson au micro-ondes, celle-ci retiendrait plus de 90 % de la vitamine C des épinards (contre 45 % pour la cuisson vapeur et 40 % pour la cuisson à l'eau) et 95 % de la vitamine K de la pomme de terre. ■

Sylvie Boistard

@syboistard

VÉRONIQUE LIESSE Diététicienne nutritionniste à Monaco

Opter pour la cuisson douce, la plus saine

« En papillote, à l'étouffée ou à la vapeur, la cuisson lente à basse température (100 °C maximum) évite la formation de composés générés par la réaction de Maillard et permet de préserver au mieux les vitamines (C, B1, B5, A et E) sensibles à la chaleur ainsi que les minéraux et les vitamines hydrosolubles du groupe B qui s'échappent habituellement dans l'eau de cuisson. Pour cette dernière, conserver le bouillon de viande ou de légumes et le préparer en soupe ou en sauce permet de bénéficier de tous les minéraux. Faire tremper les céréales et les légumineuses au préalable permet aussi de diminuer le temps de cuisson et, donc, la perte des nutriments. »

(1) Does Accumulation of Advanced Glycation End Products Contribute to the Aging Phenotype ?, Semba R. et al, *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2010.

(2) Advanced glycoxidation end products in commonly consumed foods, Goldberg T. et al, *Journal of the American Dietetic Association*, 2004.

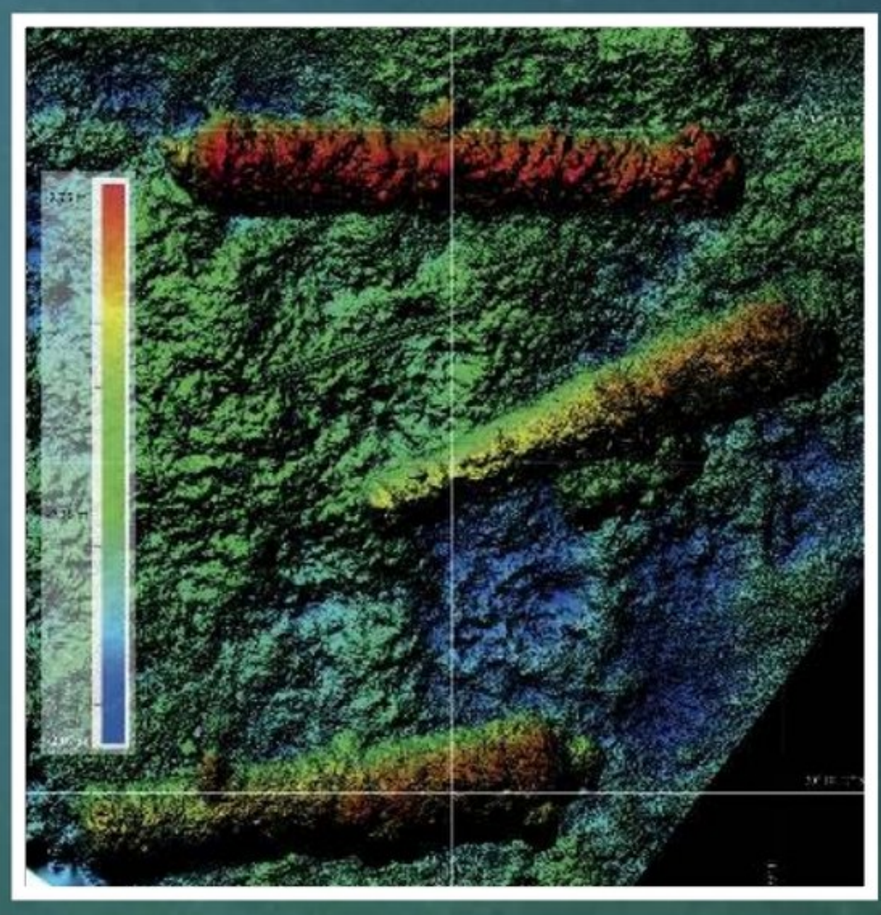
(3) Cuisson et cancer, pourquoi pas ? Lecerf JM, *La Lettre du cancérologue*, 2012.

(4) Carcinogenicity of polycyclic aromatic hydrocarbons, Straif K. et al, *The Lancet Oncology*, 2005.

(5) Cuisson au barbecue : comment prévenir les risques pour la santé ? Anses, 2020.

(6) The rehabilitation of raw and brown butters by the measurement of two of the major Maillard products, Nε-carboxymethyl-lysine and 5-hydroxym ethylfurfural, with validated chromatographic methods, Niquet-Léridon C. et al, *Food Chemistry*, 2015.

(7) Effect of different cooking methods on the content of vitamins and true retention in selected vegetables, Lee S. et al, *Food Science and Biotechnology*, 2018.



Lors de la mission archéologique de 2021, des vestiges du « Speaker » ont été pris en orthophotographie afin d'établir un plan numérique du site (ici trois canons).

YANN VON ARNIM - C. MATHEVOT

L'épave du « Speaker », navire négrier français capturé par le pirate John Bowen, gît au large de l'île Maurice depuis 1702. Découverte en 1979 et partiellement fouillée, elle a fait l'objet d'une campagne archéologique en 2021. Ci-dessus, deux des 34 canons en fonte retrouvés.

Pirates

Plongée sur les épaves des insaisissables écumeurs des mers

Des milliers de pirates ont sillonné les océans à la fin du XVIIe siècle. Une vie d'aventures violente qui finissait souvent par un naufrage. L'archéologie de la piraterie a pour but de réinvestir scientifiquement ces épaves qui pourraient bien disparaître avec la mode de la chasse au trésor et l'aggravation du réchauffement climatique.

Par Marine Benoit @ marin_eben

En 1881, lorsqu'il publie dans un magazine pour enfants les premières pages de son roman *L'Île au trésor*, Robert Louis Stevenson est loin de se douter qu'il va non seulement marquer des générations entières, mais aussi idéaliser un pan de l'histoire : l'âge d'or des pirates, une période d'à peine cinquante ans située entre les années 1680 et 1730. Si la piraterie est apparue dès l'Antiquité, le nombre de navires au pavillon noir présents sur les mers chaudes du globe va atteindre des sommets au cours de ces décennies. On estime en effet qu'en 1730, plusieurs milliers de bateaux pirates sillonnent la mer des Caraïbes et l'océan Indien, encouragés par le va-et-vient de navires marchands lourds des richesses qu'offrent les Indes et le continent américain. Pourtant, à ce jour, parmi les trois millions d'épaves de toutes époques confondues qui reposent au fond des océans, seules six ont été localisées et attestées comme celles de navires pirates. « *L'archéologie de la piraterie est balbutiante* », regrette Jean Soulat, archéologue spécialiste de la culture matérielle au laboratoire Landarc de l'université de Caen et fondateur de l'association Archéologie de la piraterie (ADLP). « *Le domaine s'est un peu développé et institutionnalisé outre-Atlantique dans les années 1980, mais il souffre des interventions quasi systématiques des chasseurs d'épaves qui n'ont aucune méthodologie scientifique et qui pratiquent le pillage.* »

ANNE HOYAU-BERRY

« L'un des principaux critères d'identification d'un bateau pirate est la mixité géographique du mobilier »

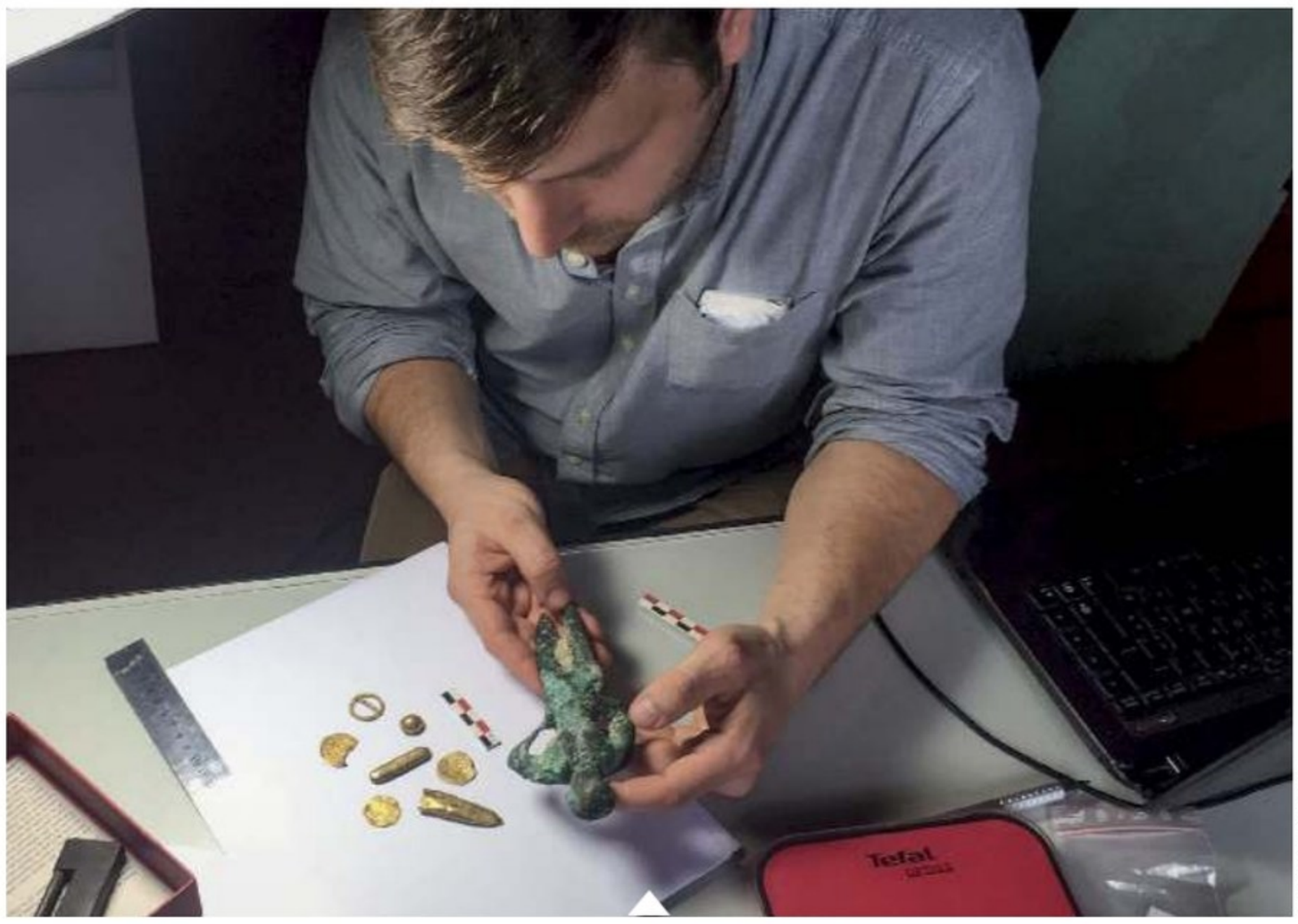
Anne Hoyau-Berry, archéologue sous-marine

Née en 2019, l'archéologie de la piraterie rassemble une dizaine de chercheurs, parmi lesquels des archéologues sous-marins, des océanographes et des historiens. Elle a notamment pour but de réinvestir scientifiquement ces sites archéologiques qui pourraient bien disparaître avec la mode de la chasse au trésor et le réchauffement climatique. Le tout dans l'espoir de mieux comprendre, à distance de la fiction, qui étaient réellement ces hommes — marins, anciens militaires ou marchands — ayant fait le choix d'une vie de hors-la-loi, souvent loin de tenir ses promesses *(lire l'encadré ci-contre)*. En novembre 2021, Jean Soulat est ainsi parvenu à monter une campagne de fouilles sur le site abritant ce qu'il reste du *Speaker*, un navire négrier français dont s'empara en avril 1700 le pirate anglais John Bowen et qui s'écrasa en janvier 1702 sur le récif de Saint-Thomas, sur la côte est de l'île Maurice, en raison d'une tempête et d'un équipage imbibé de rhum. Rescapé, ce dernier rapatriera à terre une bonne partie du trésor présent à bord.

Des objets liés à la traite négrière ont été découverts

L'épave du *Speaker* n'a été découverte qu'en 1979. Deux fouilles partielles furent alors effectuées, mais à l'exception de quelques notes de travail, il n'y eut aucun rapport scientifique. « *C'est pourquoi, avec l'océanographe et archéologue sous-marin Yann von Arnim, nous avons eu envie d'y retourner* », explique Jean Soulat. Conservés entre 3 et 7 mètres de profondeur, les vestiges du *Speaker* sont encore nombreux : 34 canons et trois grandes ancres en fonte gisent sur le sable sur plus de 400 mètres de périmètre, et des secteurs du site préservés présentent encore probablement du mobilier piégé dans le corail. À ce jour, pas moins de 1746 objets remontés sont conservés au Musée national d'histoire de Mahébourg (île Maurice). Parmi eux, des pièces d'artillerie et des munitions, des accessoires vestimentaires, des pipes, de la vaisselle, des instruments de navigation, des chandeliers, clochettes et autres éléments du mobilier de bord. « *Nous avons aussi retrouvé des objets liés à la traite négrière,* complète Jean Soulat. *Notamment un collier d'esclave coupé en deux, très probablement lors du partage du butin qui se faisait de façon équitable. Sur d'autres navires, on a même observé des lingots divisés en deux. C'est à ce genre de détails que l'on reconnaît un navire pirate.* »

Ce sont en effet les objets retrouvés sur l'épave, et non le navire lui-même, qui permettent aux archéologues d'affirmer qu'un bateau servait la cause des pirates. « *L'un des principaux critères d'identification est la mixité géographique du mobilier,* assure Anne Hoyau-Berry, archéologue sous-marine et membre de l'équipe. *Et notamment des pièces d'artillerie et de monnaie, qui viennent souvent de partout dans le monde.* » À bord du *Speaker* ont été recensées pas moins de 34 pièces de monnaie (en or, argent et cuivre) en provenance de 19 pays différents. « *C'est toute la difficulté de notre travail : pouvoir attester d'un contexte de piraterie qui est quand même très proche archéologiquement d'un contexte corsaire* [le corsaire pillait les navires ennemis pour le compte d'un État, et donc légalement] *ou même d'un bateau de commerce.* » Ce sont alors les archives, quand elles existent, qui achèvent de coller l'étiquette « pirate » sur une épave en renseignant sur la zone et la date d'un naufrage de forbans.


YANN VON ARNIM

L'archéologue Jean Soulat étudie une statuette indienne provenant de l'épave du « Speaker » dont plus de 1700 objets ont été remontés et inventoriés.

DÉCRYPTAGE

Les forbans, loin des clichés

Les pirates, cruels et sanguinaires ?

L'idée selon laquelle les pirates passaient systématiquement à l'abordage armés jusqu'aux dents, prêts à donner des coups de sabre au moindre matelot sur le pont adverse, est loin de la réalité. Les pirates avaient au contraire tout intérêt à éviter de passer au conflit armé, d'abord pour ne pas endommager le navire convoité et son contenu, mais aussi parce que les blessures résultant de ces attaques pouvaient leur être fatales par la suite en pleine mer, dans un contexte sanitaire plus que précaire.

Cache-œil, jambe de bois, crochet… Des accessoires réels ?

Les images de ces prothèses de fortune ont été diffusées à outrance par la culture populaire, et ne réflètent pas, là encore, la réalité historique. Pour autant, cela ne signifie pas qu'elles n'ont pas existé. Les mutilations corporelles subies par ces hommes étaient fréquentes, plus souvent occasionnées par les manœuvres à bord ou les conditions de vie en mer que par les combats. Les chercheurs estiment d'ailleurs qu'un pirate n'avait qu'entre 6 et 24 mois d'espérance de vie, expliquant qu'il ne restait jamais pirate bien longtemps… À moins de mourir sous cette étiquette.

Le pavillon noir, un drapeau fantasmé ?

Ce morceau de tissu noir flanqué d'une tête de mort, de sabres, d'ossements ou même d'un squelette entier — selon le capitaine à bord — était bel et bien hissé par les pirates face au navire attaqué, au moment qu'ils jugeaient le plus opportun. En réalité, les vaisseaux pirates avaient souvent plusieurs pavillons : un pavillon national pour tromper l'adversaire, un drapeau noir ou blanc pour intimer l'ordre au bateau de se rendre, et un drapeau rouge annonçant qu'ils ne feraient pas de quartier.

Perroquets, ouistitis… Des compagnons de bord ?

Si des animaux exotiques, destinés à divertir la haute société européenne, faisaient souvent partie des richesses rapportées sur le Vieux Continent, il n'existe aucune preuve qu'ils ont pu être « adoptés » et domestiqués à bord par les pirates. Fait notable toutefois : sur la *Dauphine*, un bateau corsaire de 1704 reposant au large de Saint-Malo, un petit squelette de macaque a été retrouvé presque intact.

Des buveurs de rhum ?

Pour sûr, les pirates étaient de très gros consommateurs de cet alcool, au point que nombre de navires se sont échoués en raison de l'alcoolémie de leur équipage. La raison de cette addiction est simple : l'eau, rationnée, venait souvent à manquer à bord, quand l'alcool, lui, se conservait facilement. Les pirates étaient aussi souvent recrutés dans les classes sociales les plus basses de société, déjà gangrenées par l'alcool.

GINO D'ACHILLE/BRIDGEMANIMAGES

AKG IMAGES

PRATIQUES

La piraterie n'était pas qu'une affaire d'hommes

Peu nombreuses, les femmes pirates n'en ont pas moins existé et, pour certaines, brillé par leur charisme. C'est le cas de l'Irlandaise Anne Bonny qui, habillée en homme pour dissimuler son sexe, navigua avec le célèbre Jack Rackham, *alias* Calico Jack, qui devint son amant. C'est à bord de son navire qu'elle rencontra une autre femme pirate à la forte personnalité : Mary Read *(illustration ci-contre)*, avec qui Anne Bonny aurait entretenu une liaison… à la source de bien des tensions avec Jack Rackham. Mary Read finira par mourir en prison, mais ce qu'il advint d'Anne Bonny reste un mystère.

Une autre difficulté est l'emplacement géographique des zones de naufrage. « *La quasi-totalité des bateaux se sont échoués dans des endroits de faible profondeur — 6-7 mètres tout au plus — et dans des zones à ouragans. Par conséquent, les épaves sont très endommagées, ce qui explique leur rareté* », souligne Jean Soulat. Le site du *Speaker* n'est par exemple accessible qu'un seul mois dans l'année, en raison des vents violents et de la houle qui balayent cette partie de la côte de façon quasi permanente. « *Même là, sous l'eau, nous étions sans cesse ballottés sur plusieurs mètres, comme dans une machine à laver. Au point que certains membres de l'équipe en plongée ne pouvaient plus travailler à cause du mal de mer !* » À l'issue de dix jours de fouilles, Jean Soulat et son équipe ont pu enfin fournir une cartographie numérique de l'épave, établir un constat de l'état des vestiges et rapatrier plusieurs nouveaux objets. Comme le *Speaker*, les cinq autres épaves pirates connues mériteraient, elles aussi, une nouvelle fouille approfondie. Il y a bien sûr celle du *Whydah Gally*, bateau du capitaine anglais Samuel Bellamy qui sombra en 1717 au large du cap Cod, dans le Massachusetts (États-Unis). Si celle-ci fut entièrement fouillée entre 1984 et 2008, les publications scientifiques à son sujet sont quasi inexistantes. Ses vestiges sont pourtant exceptionnels : parce que le naufrage soudain du navire causa la mort de presque tout l'équipage, dont Samuel Bellamy, le fabuleux trésor qu'il contenait fut englouti, de sorte qu'une importante partie put en être dégagée par les plongeurs. Des centaines de pièces d'or, d'armes, d'objets de la vie courante et même de pièces d'habillement encore préservées ont été retrouvées et sont aujourd'hui visibles au Whydah Pirate Museum à Yarmouth.

Le *Queen Anne's Revenge*, vaisseau d'Edward Teach, alias Barbe Noire, qui coula en 1718 au large de Beaufort, en Caroline du Nord, et qui fut partiellement fouillé entre 1997 et 2016, mériterait lui aussi de nouvelles investigations ; tout comme le *Quedagh Merchant*, navire associé au corsaire William Kid, qui s'abîma en 1699 non loin de l'île Catalina, en République dominicaine, exploré une fois en 2008.

J. SOULAT

Parmi les pièces d'or retrouvées dans l'épave du « Speaker », ce dirham du Caire (recto verso, en haut) et ce ducat vénitien (en bas).

La baie d'Ambodifotatra, un vrai repaire de pirates

Même chose pour le *Great Ranger* de Bartolomew Roberts, qui gît depuis 1722 dans la baie de Port Royal, en Jamaïque, et qui n'a été fouillé qu'à 40 % ; ou pour les épaves reposant au large de l'île Sainte-Marie, à Madagascar. L'une d'elles pourrait être celle du *Feary Dragon* de Christopher Condent, dit Billy One-Hand (« une seule main »). Le navire aurait été sabordé en 1721 par son équipage en échange d'une grâce offerte par les autorités. Cette zone de l'océan Indien, la baie d'Ambodifotatra, apparaît dans les sources historiques comme un vrai repaire de pirates des années 1690 à 1730, au point qu'elle fut probablement le principal foyer de piraterie de l'océan Indien. En mai 2022, Jean Soulat et une équipe ont pu effectuer une toute première mission de reconnaissance archéologique terrestre sur l'île Sainte-Marie. « *Nous avons inventorié les potentiels vestiges laissés par les pirates à terre, mais nous n'avons pas eu l'autorisation de plonger* », regrette l'archéologue. En 2024, lui et les membres de l'ADLP devraient retourner à Sainte-Marie dans l'espoir, cette fois, d'enfiler leur combinaison sous-marine. ■

ANNE-CAROLINE RENDU-LOISEL
ASSYRIOLOGUE

Retrouver les sons et les odeurs de la Mésopotamie

ANNE-CAROLINE RENDU-LOISEL

Anne-Caroline Rendu-Loisel est maître de conférences en assyriologie à l'université de Strasbourg.

Entretien avec cette spécialiste de l'archéologie de l'Orient ancien dont une partie des travaux consiste à récréer l'atmosphère sonore et olfactive des rituels divins de l'ancienne Mésopotamie.

Dans votre conférence au festival d'Avignon, vous vous interrogerez sur la façon de « retrouver le passé mythique » du temps de Gilgamesh, ce récit épique de la Mésopotamie. Quel est ce « passé mythique » si lointain ?

Il s'agit de la façon dont la mythologie mésopotamienne tente de reconstruire les événements lointains de son histoire. Pour ces peuples ayant vécu il y a près de 5000 ans, le passé est forcément lié à la présence divine. Nous pensons que les textes qui relatent les rituels effectués dans les temples dédiés à leurs dieux — Marduk, Enki, Nanna… — étaient écrits au moment de la restauration des bâtiments sacrés. Ces épisodes de remise « à neuf » étaient très concentrés sur la recherche de la première brique, du « moment originel ». Les rois babyloniens en particulier, comme Nabonide et Nabuchodonosor au VI^e^ siècle avant J.-C., ont laissé des tablettes dans lesquelles ils affirment être allés *« au plus profond dans les fondations »* et être *« remontés jusqu'à Sargon »*, qui régna près de 2000 ans avant eux.

Est-il possible de retrouver aujourd'hui les émotions et les sensations que les Assyriens éprouvaient lors de leurs cérémonies rituelles ?

Nous n'avons malheureusement que très peu de vestiges archéologiques matériels, mais des textes nous renseignent sur l'atmosphère qui régnait dans ces lieux. Les matériaux employés pour la construction de ces temples sont notamment listés. Nous savons aussi, grâce à l'iconographie notamment, quels instruments de musique étaient utilisés au cours de ces événements rituels. Les textes nous apprennent qui étaient les musiciens et nous permettent d'imaginer les doux chants qui résonnaient dans ces vastes espaces bâtis. Nous avons tout de même retrouvé un instrument, une lyre à tête de bœuf qui daterait d'environ 2400 avant J.-C., surnommée la lyre d'Ur et conservée au British Museum (Royaume-Uni). Enfin, nous avons des renseignements sur les odeurs qui régnaient dans ces endroits : celle du cèdre, la fragrance des dieux, devait dominer au plus proche de la statue de la divinité, et d'autres matériaux végétaux odorants comme le myrte ou le genévrier.

Pourrions-nous envisager de récréer les sons et les odeurs de la Mésopotamie rituelle ?

Bien sûr. Beaucoup de choses ont été faites autour des instruments de musique puisque nous savons à quoi ils ressemblaient. Des recherches ont également été menées pour déterminer la façon dont était utilisée la couleur dans ces temples — omniprésente et vivace. Nous sommes aussi nombreux à avoir tenté de retrouver le goût des aliments servis lors de ces événements, notamment de la bière, à laquelle du sirop de datte était ajouté pour augmenter la fermentation. Mais nous avons très vite été déçus par les saveurs… Ce ne sont pas du tout celles dont nous sommes familiers aujourd'hui. ■

Propos recueillis par Marine Benoit

@marin_eben

PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

« La fabrique des sociétés » au festival d'Avignon

L'Agence nationale de la recherche (ANR) et le festival d'Avignon organisent la 10^e^ édition des Rencontres recherche et création sur « la fabrique des sociétés », en partenariat avec *Sciences et Avenir*, les 10 et 11 juillet. Inscription et programme à retrouver sur www.recherche-creation-avignon.fr

VOISIN/PHANIE/AFP

12 questions pour...

passer l'été en bonne santé

Se protéger contre les moustiques et les coups de soleil, éviter les problèmes intestinaux, bien dormir... Pendant les vacances, prendre soin de sa santé doit rester une priorité. Encore faut-il distinguer le vrai du faux !

Par Émilie Gillet , avec Agence Forum News

1 Lors d'un vol long-courrier, il est recommandé de porter des chaussettes de contention

☐ VRAI ☐ FAUX

2 Certaines personnes attirent plus les moustiques que d'autres.

☐ VRAI ☐ FAUX

CDC / BSIP/AFP

3 Tous les moustiques ne piquent pas au même moment de la journée

☐ VRAI ☐ FAUX

4 Les insectes peuvent transmettre des maladies

☐ VRAI ☐ FAUX

5 Les crèmes solaires bio protègent aussi bien que les traditionnelles

☐ VRAI ☐ FAUX

6 On peut réutiliser la même crème solaire d'une année sur l'autre

☐ VRAI ☐ FAUX

7 Les yeux clairs sont plus sensibles à la lumière du soleil

☐ VRAI ☐ FAUX

8 Avant de se baigner, il est recommandé de se mouiller la nuque et les poignets

☐ VRAI ☐ FAUX

9 On aurait moins besoin de dormir l'été

☐ VRAI ☐ FAUX

10 La constipation est plus fréquente pendant les vacances

☐ VRAI ☐ FAUX

11 Le soda est conseillé en cas de « turista » ou diarrhée du voyageur

☐ VRAI ☐ FAUX

12 On meurt plus en été qu'en hiver

☐ VRAI ☐ FAUX

MARTIN BERTRAND / AFP

Réponses page suivante

Le Parisien & LIVE NATION

présentent

Paris PARADIS

VEN. 8, SAM. 9 & DIM. 10 SEPTEMBRE 2023

5 ÈME EDITION

PARC DE LA VILLETTE

MUSIQUE

JOÉ DWÈT FILÉ ZAHO DE SAGAZAN
THE INSPECTOR CLUZO FRANGLISH MOSIMANN
PATRICE KERCHAK TSEW THE KID LE JUIICE NUIT INCOLORE
EHLA KO KO MO DOYA KALIKA MANAL SILMARILS ...

HUMOUR

THOMAS NGIJOL MANU PAYET
TAREEK MERWANE BENLAZAR MORGANE CADIGNAN NASH
SEBASTIAN MARX FANNY RUWET AHMED SPARROW ...

BILLETS DISPONIBLES SUR
PARIS-PARADIS.LEPARISIEN.FR, LIVENATION.FR & TICKETMASTER.FR

SUIVEZ NOUS !
@PARISPARADISFESTIVAL

Région îledeFrance · orange · Bolt · Véligo · eau de Paris · RATP · la Villette · Cabaret Sauvage

12 réponses... pour un été sans problèmes

1 Lors d'un vol long-courrier, il est recommandé de porter des chaussettes de contention

VRAI Lors d'un long vol, plusieurs facteurs perturbent la circulation sanguine : l'immobilisation prolongée en position assise, une atmosphère sèche combinée à un manque d'hydratation et la faible pression atmosphérique en cabine. Cela peut provoquer une sensation de jambes lourdes, accompagnée éventuellement d'un œdème au niveau des pieds et des chevilles. Pour conserver un bon retour veineux, il est donc vivement conseillé de porter des chaussettes ou bas de contention.

2 Certaines personnes attirent plus les moustiques que d'autres

VRAI Les moustiques sont attirés par le CO_2 présent dans l'air expiré, or son taux est plus important chez les femmes, les personnes en surpoids, celles qui ont fait du sport ou consommé de l'alcool. La sueur les attirerait aussi car elle contient de l'acide lactique ; les individus du groupe sanguin O auraient 85 % de risque supplémentaire de se faire piquer par rapport aux autres groupes. Des facteurs génétiques sont également suspectés.

3 Tous les moustiques ne piquent pas au même moment de la journée

VRAI En France, une quinzaine d'espèces de moustiques sont susceptibles de piquer l'humain. Les *Culex* sont les plus courants, avec comme représentant majeur le moustique commun ; ils sont surtout actifs à la tombée du jour et pendant la nuit. Les *Aedes*, de plus en plus présents en France, notamment le moustique-tigre, piquent de jour comme de nuit. Quant aux anophèles, qui vivent essentiellement dans les zones humides, ils sont surtout actifs à l'aube et au crépuscule.

4 Les insectes peuvent transmettre des maladies

VRAI Le moustique commun peut être porteur du virus du Nil occidental (2 à 27 cas humains par an en France depuis 2000). Les *Aedes*, dont le moustique-tigre, sont plus menaçants car ils peuvent véhiculer des virus comme le chikungunya, la dengue et le Zika, mais les cas autochtones dans l'Hexagone sont très rares, contrairement à l'outre-mer. Enfin, les anophèles peuvent être vecteurs du paludisme. Le dernier cas autochtone hexagonal date de 2006, en Corse, mais la maladie est encore bien présente en Guyane et à Mayotte. D'autres animaux peuvent piquer et transmettre des maladies, tels les tiques vecteurs de la maladie de Lyme et les phlébotomes, des moucherons responsables de la leishmaniose. Dans les zones tropicales, la mouche tsé-tsé peut transmettre la maladie du sommeil, les punaises la maladie de Chagas...

5 Les crèmes solaires bio protègent aussi bien que les traditionnelles

VRAI ET FAUX Si une crème solaire arbore un indice 20, 30 ou 50, c'est qu'elle répond aux critères en vigueur et garantit donc une protection contre les UV. Sauf que les crèmes solaires bio ne peuvent contenir que des filtres minéraux — type dioxyde de titane ou oxyde de zinc, qui ont une texture épaisse, blanche et souvent collante. Le risque c'est d'en appliquer moins qu'une crème classique à base de filtres chimiques, et donc d'être moins bien protégé.

6 On peut réutiliser la même crème solaire d'une année sur l'autre

FAUX D'après une étude franco-américaine publiée en 2021 dans *Chemical Research in Toxicology*, l'octocrylène, un filtre chimique fréquent dans les crèmes solaires et les crèmes anti-âge, se dégrade avec le temps en un composé de type perturbateur hormonal et possiblement cancérogène. Il est donc conseillé de ne pas utiliser un tube de crème ouvert il y a plus de six mois ou dont la date limite d'utilisation indiquée est dépassée.

7 Les yeux clairs sont plus sensibles à la lumière du soleil

FAUX Certes, l'iris protège la rétine de l'excès de rayons lumineux. Reste que ce n'est pas la première couche — bleue, marron ou verte selon les individus — qui joue le rôle de barrière, mais une seconde couche de pigments parfaitement opaques et identiques quelle que soit la couleur des yeux ! Seules les personnes atteintes d'albinisme, n'ayant quasiment aucun pigment au niveau de l'iris, ont une sensibilité plus importante à la lumière.

8 Avant de se baigner, il est recommandé de se mouiller la nuque et les poignets

VRAI Après une longue période au soleil ou au chaud dans une voiture sans climatisation, il y a un risque de choc thermique si l'on se baigne dans l'eau plus fraîche : c'est l'hydrocution (malaise vagal). Pour préparer le corps, on peut mouiller la nuque et les poignets car ces zones sont riches en terminaisons nerveuses qui informent le cerveau de la température extérieure.

9 On aurait moins besoin de dormir l'été

VRAI Dans une étude publiée en février dans *Frontiers of Neurosciences*, des chercheurs allemands expliquent avoir observé chez près de 300 personnes une heure de sommeil en plus en moyenne l'hiver. Certes, cela a été mesuré chez des personnes consultant pour des troubles du sommeil d'origine neuropsychiatrique. Mais les chercheurs suggèrent que cette saisonnalité des besoins en sommeil existerait dans la population générale.

10 La constipation est plus fréquente pendant les vacances

VRAI D'après la plus vaste étude publiée sur le sujet dans *The American Journal of Gastroenterology* en 2003, plus d'un tiers des vacanciers se plaignent de constipation plus ou moins passagère. Pour l'éviter, il faut continuer à bouger régulièrement, en faisant au moins 30 minutes d'activité physique par jour, boire beaucoup, de préférence de l'eau minérale riche en magnésium, et consommer fruits, légumes et céréales complètes qui sont riches en fibres. Enfin, il ne faut surtout pas se retenir d'aller à la selle, car cela entretient la constipation.

11 Le soda est conseillé en cas de « turista » ou diarrhée du voyageur

FAUX Certes, les sodas sont en bouteille, ce qui a l'avantage de ne présenter quasiment aucun risque de contamination par une bactérie. Mais ces boissons sont aussi très sucrées, acides et riches en caféine ! Autant de facteurs qui peuvent agresser les intestins et accélérer le transit intestinal. Mieux vaut opter pour de l'eau minérale ou même un jus de fruit en bouteille, auquel on ajoutera une pincée de sel pour favoriser la réhydratation et compenser la perte en sels minéraux.

12 On meurt plus en été qu'en hiver

FAUX À chaque canicule, sa surmortalité. En 2003, on estime qu'elle a provoqué 15 000 décès supplémentaires. En 2022, 2816 décès ont été comptabilisés selon Santé publique France. Sauf que chaque hiver, on enregistre 9 % de décès supplémentaires en moyenne en décembre, janvier, février et mars. Ainsi, d'après une étude française publiée en 2015 dans la revue *Climatologie*, la surmortalité hivernale est systématique et au moins huit fois plus importante que la mortalité estivale exceptionnelle.

72H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER
LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

29-30 SEPT. | 1ER OCT. 2023

À LA CITÉ DE LA MER,
CHERBOURG-EN-COTENTIN

À OMONVILLE-LA-ROGUE

& EN DIGITAL

*Conférences & débats portés par les plus grands spécialistes,
animations ludiques & immersives... nous accueillons petits
et grands pour une plongée unique au cœur des océans.*

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

Partenaires Associés

Partenaires Médias

Organisé par

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 118

▶ C'est à voir
p. 122

▶ Le ciel du mois
p. 124

▶ Chroniques
p. 126

▶ Questions de lecteurs
p. 128

▶ Solutions des jeux
p. 129

▶ Jeux
p. 130

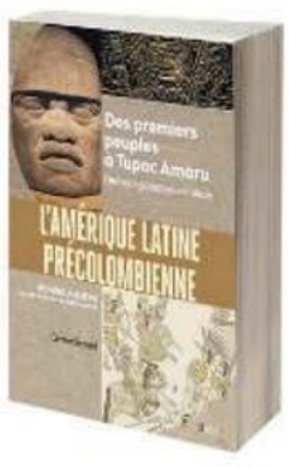
Avant Colomb

L'historienne et anthropologue Carmen Bernand offre un brillant condensé des quelque 30 000 ans d'histoire de l'Amérique latine avant l'arrivée des Européens.

« Tumi » en or et turquoises représentant Naymlap, fondateur légendaire de la culture lembayeque (env. 700–1300, Pérou).

AKG IMAGES

CIVILISATIONS Teotihuacan. Le nom fait immédiatement penser à l'une des plus vastes et des plus puissantes cités-temples ayant existé sur le continent américain dans les premiers siècles de notre ère. En plus de ses pyramides majestueuses et de son architecture urbaine extrêmement élaborée, la ville située dans la vallée de Mexico fut aussi, comme le rappelle Carmen Bernand, la première cité mésoaméricaine à concentrer une multitude de fonctions : commerciales, religieuses, artistiques et militaires. Raison pour laquelle l'historienne lui accorde une large place dans ce brillant ouvrage où, en un peu plus de 600 pages, elle nous offre un remarquable condensé des quelque 30 000 ans d'histoire de l'Amérique latine avant l'arrivée de Christophe Colomb et de ses successeurs.



Convoquant toutes les recherches les plus récentes en archéologie et en histoire, mais aussi en botanique, en géologie ou encore en ethnographie, Carmen Bernand raconte l'origine asiatique des Paléo-Indiens et leur dispersion continentale, les premières civilisations agraires d'Amérique (vers 8000 avant notre ère), la domestication du lama et l'invention de la métallurgie (horizon Chavin, entre 1000 et 200 avant notre ère), l'apparition de l'écriture glyphique (horizon olmèque, qui éclot vers 1200 avant notre ère), etc. Elle s'attarde sur les Mayas, les Aztèques et l'empire inca, et aborde aussi les « peuples de l'or » du Panama, de Colombie et des Caraïbes ainsi que la famille linguistique des Tupi-Guaranis. Complet, accessible à un large public, le livre se distingue également par la qualité de ses illustrations. Une somme aussi passionnante à lire qu'agréable à feuilleter. ■

Vincent Glavieux

L'Amérique latine précolombienne, Carmen Bernand, Belin, 624 p., 49 €

La fabrique de l'erreur dans le cerveau

BUGS Contrairement aux interprétations freudiennes qui ont fait long feu, un lapsus est rarement révélateur d'autre chose… que d'une erreur de traitement de l'information par le cerveau. Et il en va de même pour nos actes manqués, les quiproquos et autres bévues du quotidien. C'est ce que détaille dans cet ouvrage un spécialiste des sciences cognitives qui met l'accent sur le caractère éminemment faillible de notre cerveau, fonctionnant par interprétations, raccourcis et bricolages neuronaux. Ces « bugs » cérébraux ne révèlent pas de pensées inavouables. **H. J.**

La Force de nos bugs, Sebastian Dieguez, humenSciences, 352 p., 22 €

L'observateur du Muséum

TÉMOIGNAGE Naturaliste, biologiste (et spécialiste des oursins), Bruno David a été chercheur au CNRS avant de diriger durant huit ans le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Un poste d'observation privilégié pour voir monter la crise environnementale. Le scientifique raconte ici, dans un témoignage très personnel, sa prise de conscience, graduelle, *« que nous étions dans l'irrévocabilité »*. Et forme le vœu que les générations puissent, ensemble, mettre au point les solutions pour un avenir plus riant, plutôt que de s'opposer en vaines polémiques entre « boomers » et « millennials ». **O. L.**

Le Jour où j'ai compris, Bruno Davis, Grasset, 125 p., 16 €

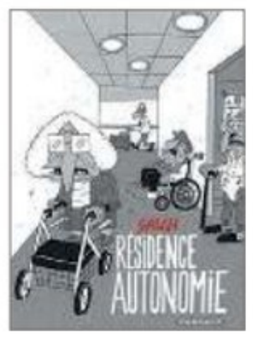
Les océans se rebellent

BD Les animaux marins ont décidé d'instruire les humains de l'état catastrophique des océans. Mais pour ne pas les braquer, ils le font avec humour sous la forme d'un plateau de stand-up qui voit défiler des représentants de la vie marine, de l'invisible picoplancton à la baleine, en passant par les coraux, poissons et autres tortues. Chacun explique son mode de vie, son utilité dans le fonctionnement des océans, mais aussi les dangers que fait peser sur eux l'exploitation de plus en plus massive des océans. Cette BD, à la fois drôle et sombre, s'achève sur une lueur d'espoir. **S. R.**

Le Monde du silence gueule !, Julia Duchaussoy et Sébastien Samingue, Marabulles, 128 p., 19,95 €

Dans les coulisses du grand âge

BD Éric Salch croque ici l'authentique témoignage d'un ami, Marc, recruté comme agent social dans une résidence pour personnes (très) âgées. Rire jaune et humour noir sont au rendez-vous de cette BD qui dévoile les coulisses de cette « Résidence autonomie ». Sans rien cacher du quotidien morose des résidents, aux caractères haut en couleur, Éric Salch signe une jolie fresque sur la fin de vie, toujours entre deux tournées drôlissimes de distribution de médicaments. **H. J.**

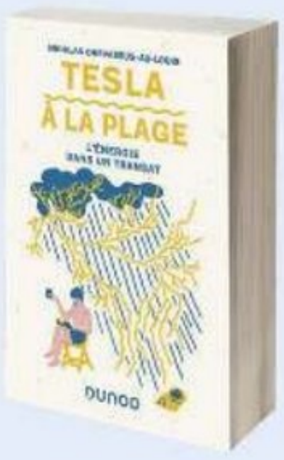


Résidence autonomie, Éric Salch, Dargaud, 176 p., 24 €

Dinosaures : au-delà de la magie de l'écran

DÉMYTHIFICATION Fondateur du musée des Dinosaures d'Espéraza (Aude), féru de pop culture, Jean Lelœuff s'est fait une spécialité de démythifier la représentation de ces lézards terribles au cinéma sans pour autant mépriser les capacités d'anticipation de ces œuvres. *« Tous les fans* de Jurassic Park *le savent : les raptors chassent en meute, ouvrent des portes avec leurs petites pattes et tendent des pièges mortels. Les tyrannosaures, eux, sont dépourvus d'odorat mais captent le moindre mouvement*, écrit-il. *Mais ces capacités collent-elles à la réalité ? »* Il a eu l'idée géniale de nous glisser dans la peau d'un dinosaure, en s'appuyant sur les découvertes les récentes. Comment voyaient-ils, qu'entendaient-ils ou sentaient-ils ? Étaient-ils stupides ou malins ? Vivaient-ils en bande ou en solitaire ? Un bijou de vulgarisation, avec en prime leur découverte en réalité augmentée. ■ **R. M.**

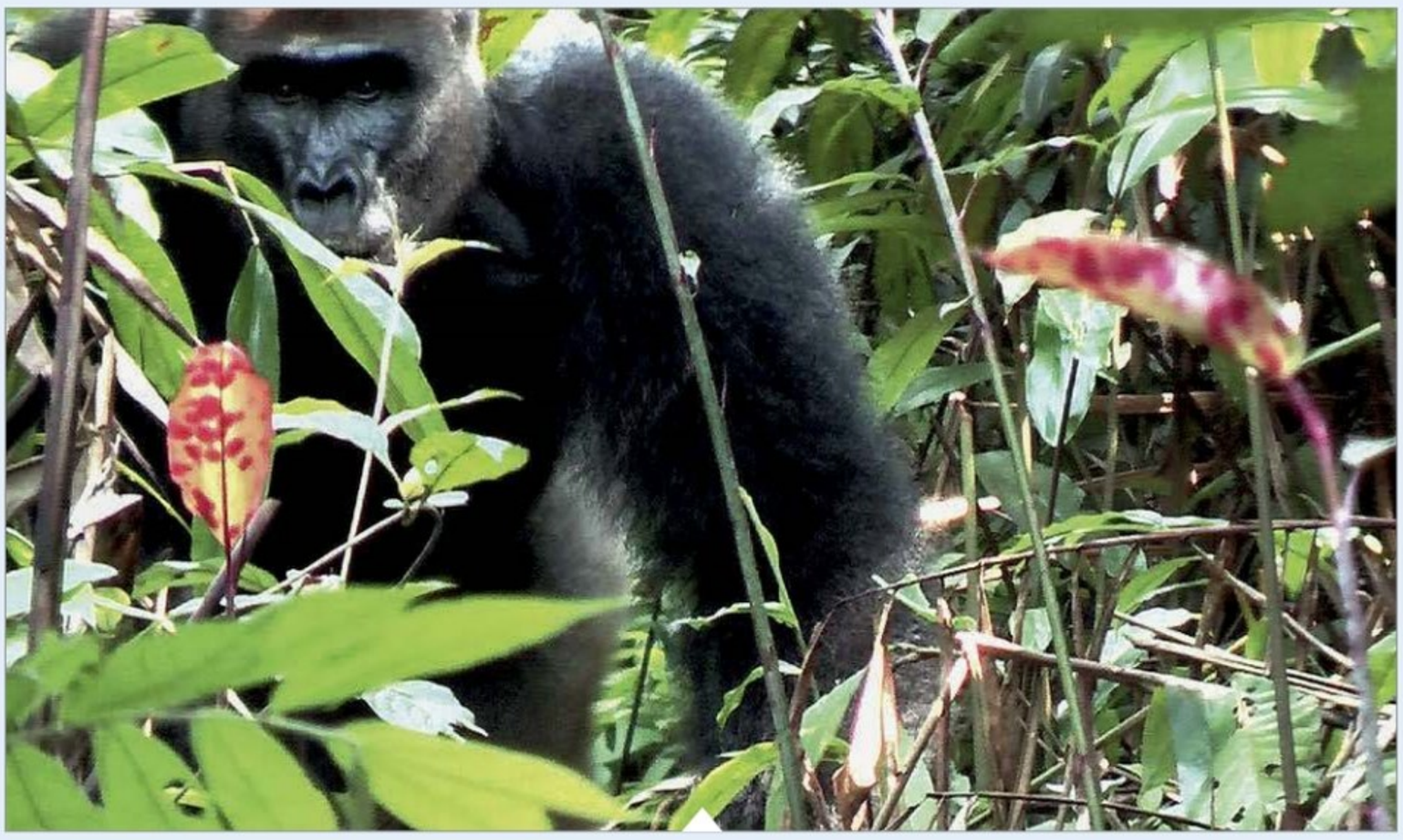
Dans la peau d'un dinosaure, Jean Lelœuff, HumenSciences, 212 p., 19,90 €



Génie alternatif

TRAJECTOIRE Incroyable destin que celui de Nikola Tesla (1856-1943). Né en Serbie, ce physicien et inventeur de génie connut la gloire aux États-Unis où il travailla un temps avec un autre prodige, Thomas Edison. Il reste célèbre pour ses travaux sur le courant alternatif, dont il fut l'ardent défenseur pour la production et la distribution d'électricité, s'opposant au courant continu d'Edison. Mais sa curiosité fantasque était sans limite. Il participa activement à la mise au point de la transmission sans fil (TSF), ancêtre de la radio. Développant un concept de mise en relation globale des habitants de la planète grâce à la TSF, Nikola Tesla peut même être considéré comme le père spirituel d'Internet. Mais tout cela a eu un prix : son psychisme hors du commun le projetait à la fois dans des hallucinations créatrices et des douleurs atroces… L'auteur réussit tout à la fois à résumer ce destin hors du commun, et à vulgariser les notions de physique indispensables pour comprendre le génie de Tesla. ■ **Fabrice Nicot**

Tesla à la plage, Nicolas Chevassus-au-Louis, Dunod, 176 p., 15,90 €



MAX HURDEBOURCQ

Pendant dix ans, Max Hurdebourcq a parcouru une zone forestière près de Lastourville (Gabon) pour observer les gorilles et sensibliser les populations environnantes à leur préservation.

Entre gorilles et forestiers

Le naturaliste Max Hurdebourcq livre le récit d'une décennie d'observations des relations entre humains et gorilles au Gabon. Le témoignage poignant d'une désillusion.

TERRITOIRE Naturaliste autodidacte, Max Hurdebourcq a pu pénétrer le milieu fermé des forestiers, hérissés par les critiques des ONG. Endurant les crises de paludisme ou le jeu politique, il s'est incrusté pendant dix ans dans une concession durable en voie de certification du Gabon, 600 000 hectares de forêt dense, humide et tropicale, pour observer l'impact sur les gorilles d'une exploitation plus vertueuse. De ces séjours, il a notamment tiré deux reportages pour *Sciences et Avenir* (n° 722 et n° 743) et une vidéo de charge de grands singes*. Il a aussi mis en place des partenariats scientifiques, avec des primatologues et des botanistes des universités de Barcelone (Espagne) ou Gembloux (Belgique).

Les premières constatations de terrain en 2008 étaient optimistes, les gorilles semblant s'adapter à l'intrusion sur leur territoire. Le naturaliste rêve alors de développer un écotourisme financé par des mécènes et d'acheter une paix territoriale pour les primates qu'il observe et dont il détecte les déplacements et points de chutes auprès des clairières abreuvées. Le solitaire s'engage dans des missions de sensibilisation auprès de toutes sortes de populations, mais enrage du manque de moyens ou de réalisme, y compris d'associations naturalistes dotées des meilleures intentions. La désillusion s'installe, tandis que la forêt, où vivent bien d'autres espèces, n'en finit plus d'être mangée, les braconniers de sévir. Ce récit sonne comme un avertissement d'autant plus précieux qu'il est rare. ■

Rachel Mulot

* sciav.fr/917gorilles

L'Homme qui murmure à l'oreille des gorilles, Max Hurdebourcq, Éditions du Rocher, 316 p, 19,90 €

Neandertal, si proche, si lointain

RÉCIT Pourquoi une espèce meurt-elle ? Avec ses fouilles dans la grotte Mandrin (Drôme), Ludovic Slimak,

chercheur au CNRS, a bouleversé la chronologie des rencontres possibles entre nos cousins néandertaliens et nos aïeux *H. sapiens (lire* S. et A. *n° 916)*. Dans un style inimitable, il revient sur la découverte, en 2015, du dernier *Homo neanderthalensis*. Baptisé Thorin, cet individu est le seul à peu près complet trouvé depuis Pierrette, à Saint-Césaire (Charente-Maritime) en 1979. **R. M.**

Le Dernier Néandertalien, Ludovic Slimak, Odile Jacob, 294 p., 22,90 €

Vercingétorix, bien plus qu'un chef de guerre

PORTRAIT Lorsqu'on lit la biographie de l'emblématique chef gaulois qui tint tête à César, signée Yann Le Bohec, spécialiste de l'histoire militaire romaine, on comprend que les manuels d'histoire brossent un

portrait bien mince de ce stratège redoutable. On y découvre, notamment, que Vercingétorix était bien plus qu'un meneur : par son charisme et son art du commandement, il parvint à transformer un groupe d'insurgés en une véritable armée. Il fut aussi un leader qui se sacrifia pour ses hommes, en offrant sa reddition au proconsul après la défaite d'Alésia. **M. B.**

Vercingétorix : stratège et tacticien, Yann Le Bohec, Tallandier, 320 p., 21,90 €

Un tour du monde dans une assiette

BIODIVERSITÉ Après *L'Éloquence de la sardine*,

hilarante évocation du « monde du silence », le biophysicien Bill François récidive avec un simple menu entrée-plat-dessert des plus copieux... en anecdotes ! C'est fou ce que peuvent raconter les pistaches de l'apéro ou les simples fayots, sitôt que l'on s'intéresse au long voyage qu'ils ont fait dans l'espace et le temps avant d'arriver dans nos assiettes. Cet ouvrage, qui ne se résume pas mais se *« déguste »*, risque surtout de vous faire dîner froid, tant vous aurez d'histoires à raconter à vos convives... Un comble ! **F. N.**

Le Plus Grand Menu du monde, Bill François, Fayard, 272 p., 19,50 €

Ce que les chatbots disent de nous

LANGAGE Depuis l'automne 2022, c'est la déferlante ChatGPT, et l'affolement général autour d'une nouvelle génération d'agents conversationnels. Parfaitement d'actualité, cet essai signé d'un directeur de recherche au CEA-Saclay arrive à surprendre.
D'un côté, la technologie est parfaitement détaillée, de l'autre l'auteur explore cette fascination de l'humain pour le langage, citant les philosophes grecs, Thomas Hobbes ou les écrits bibliques au même titre que des échanges avec LaMDA, le chatbot de Google. **A . D.**

Parole de machines, Alexei Grinbaum, HumenSciences, 192 p. 17,90 €

Une vie d'aventure consacrée aux arbres

BIOGRAPHIE Botaniste de renommée mondiale, Francis Hallé s'est confié à l'auteure de cette biographie qui retrace les lignes fortes de son parcours. Elle fait le portrait du scientifique, diablement engagé pour la préservation des forêts tropicales, de l'amoureux des plantes qui en a esquissé les formes dans ses dessins. Au fil des pages, l'auteure détaille les récits d'exploration : en Indonésie, au Brésil, en Chine, en Afrique... Sans oublier son dernier projet : recréer une forêt primaire en Europe. **A. De B.**

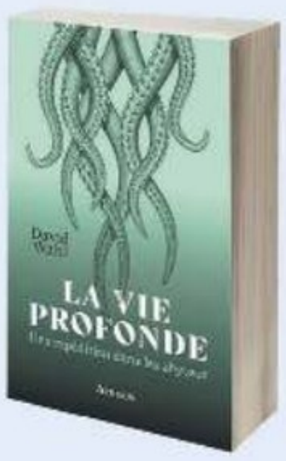
Francis Hallé. Les vies heureuses du botaniste, Laure Dominique Agniel, Actes Sud, 208 p., 14,99 €

Visages de la France

DIVERSITÉ Une fois vue, on n'oubliera pas la couverture jocondesque d'*Elle pourrait s'appeler Mona*, la dame à la choucroute fauve. Ceci n'est pas un *selfie*. C'est l'un(e) des 47 êtres humains qui ont accepté qu'un autre leur tire le portrait. Tirer, au Moyen Âge, signifiait dessiner et de fait, c'est un visage qui apparaît quand on referme l'ouvrage. Celui de la France du début du XXIe siècle et sa diversité d'actrices et acteurs. L'auteur Dominique Pasquet, concepteur des couvertures de *Sciences et Avenir*, avoue que ce livre est le résultat unique d'un *« exercice tordu »* : avoir demandé à des écrivains, des journalistes (dont trois de *S. et A.*), 24 textes qui *« illustrent ses photos »*. Entre l'avertissement d'Alain Genestar, ex-*Paris Match*, qui voit dans ce livre *« une vengeance »* de celui qui, d'habitude, est chargé d'illustrer des textes, et la chronique de la critique d'art Dominique Baqué pour qui *« tout visage demeure à jamais une énigme »*. Tel celui de Mona. ■ **Dominique Leglu**

Elle pourrait s'appeler Mona, Dominique Pasquet, éditions lelivredart, 104 p., 32 €

Plongée poétique



JOURNAL DE BORD Accueillir des artistes à bord du navire océanographique *Pourquoi Pas?* afin de partager, puis restituer dans une création théâtrale l'expérience vécue autour des études des profondeurs marines ? C'est l'aventure imaginée en 2017 par deux spécialistes des écosystèmes des abysses à l'Ifremer, Pierre-Marie Sarradin, et Jozée Sarrazin, embarqués pour sonder un champ de sources hydrothermales à 1700 mètres de profondeur au milieu de l'océan Atlantique.
Le dramaturge et interprète David Wahl, enthousiaste invité, la raconte d'une plume enlevée, résonnant de perceptions sensibles et d'émotions, dans ce journal de bord cultivé, nourri par le partage actif des manips des chercheurs et par des réflexions sur les mystères inépuisables de la vie profonde. Sa poétique personnelle puise dans la science une inspiration essentielle, matière à émerveillement : *« La science bouleverse quand elle s'échappe des laboratoires »*, avoue-t-il, nous transforme, modifie notre relation au monde, devient philosophie de vie. ■ **Andreina De Bei**

La Vie profonde. Une expédition dans les abysses, David Wahl, Arthaud, 224 p., 18 €

Le cachalot illustré

BD Avant de rencontrer le plongeur François Sarano, la coauteure de cette réjouissante bande dessinée se demandait comment donner forme à un cachalot... Expérience réussie ! Le duo a produit un récit illustré attachant et dense, irrigué par les connaissances du spécialiste et relevé par la drôlerie des textes et la fraîcheur des dessins. Anatomie, comportements, instants de bonheur partagés par le scientifique plongeur... incitent à la compréhension et au respect de ces fabuleuses créatures. **A. De B.**

S'il te plaît, dessine-moi un cachalot, Pome Bernos & François Sarano, Actes Sud, 125 p., 22 €

EXPOSITIONS

Amboise (37)

Léonard de Vinci et l'anatomie, la mécanique de la vie
Livres d'époque, maquettes, dessins, instruments de dissection aident à comprendre comment Léonard de Vinci s'était constitué un savoir d'anatomiste. Ces travaux préparaient un traité d'anatomie que l'artiste-inventeur n'a jamais publié.

Château du Clos Lucé, 2, rue du Clos-Lucé, jusqu'au 17 septembre. Rens. : 02.47.57.00.73.

Amiens (80)

Le retour de la momie & des cercueils
Après leur restauration entre 2020 et 2022, deux ensembles funéraires égyptiens comprenant une momie et trois cercueils sont à nouveau exposés. Ils sont accompagnés de photographies UV, de vues infrarouges et de radios.
Musée de Picardie, 2, rue Puvis-de-Chavanne, jusqu'au 31 décembre. Rens. : 03.22.97.14.00.

Bordeaux (33)

Mange-moi, si tu peux
L'alimentation des animaux est explorée non pas en fonction du régime (herbivore, carnivore, omnivore), mais selon que les produits sont liquides, solides, inertes, mobiles, grands, petits, suivant un découpage du zoologue Charles Maurice Yonge de 1928.
Muséum, 5 place Bardineau, jusqu'au 31 décembre 2025. Rens. : 05.24.57.65.30.

Brest (29)

Océanolab
Ce nouveau lieu de l'aquarium de Brest veut rendre la science visible pour le public. Sur une période d'un an, les visiteurs peuvent suivre des travaux de chercheurs en résidence dans le domaine de l'écologie marine.
Océanopolis, port du Moulin-Blanc. Rens. : 02.98.34.40.40.

Paris (75) / Parc

Saison Prédateurs

F-G GRANDIN/MNHN

Caméléon panthère du zoo parisien.

À l'écoute du mot « prédateur », il y a de grandes chances que vous pensiez « jaguar », « lion », « lynx », « loup », au lieu d'imaginer une libellule ou un caméléon. *« Dans l'imaginaire collectif, les prédateurs sont souvent associés à des animaux dotés de griffes et de crocs. Ils sont en fait bien plus diversifiés »*, explique Alexis Lécu, directeur scientifique du Parc zoologique de Paris, présentant la saison thématique. Or, qu'est-ce qu'un prédateur ? *« Tout être vivant qui chasse et tue un animal en vue de se nourrir ou de nourrir ses congénères »*, apprend-on au zoo. Un parcours de visite, des animations et une mini-exposition évoquant une vingtaine de spécimens où les loups et les lions côtoient les milans, les suricates, les grenouilles-taureaux et même les étoiles de mer — capables d'ouvrir les coquilles d'huîtres ou de moules et de déployer leur estomac hors du corps pour ingérer la proie. D'autres prédateurs, redoutables, sont impossibles à voir : soit ils n'existent plus sur Terre, soit ils vivent dans un milieu inaccessible à l'humain… Mais ils sont à découvrir ici.
Lire notre reportage : sciav.fr/917preda ■

Lise Loumé

Parc zoologique de Paris, avenue Daumesnil, jusqu'au 5 novembre. Rens. : 08.11.22.41.22.

Le Havre (76)

Esclavage, mémoires normandes
Sur trois sites distincts au Havre, à Honfleur et à Rouen est détaillée l'implication de la Normandie dans la traite atlantique entre 1750 et 1848. Documents d'archives et objets font état de la connaissance scientifique sur le sujet.
Hôtel Dubocage de Bléville, 1, rue Jérôme-Bellarmato, jusqu'au 10 novembre. Rens. : 02.35.42.27.90.

Lyon (69)

Nous, les fleuves
Ce parcours évoque les différentes relations que tissent les sociétés humaines avec les fleuves, que ce soit sous l'angle de la biodiversité, des arts ou de la géopolitique.
Lire notre reportage : sciav.fr/912fleuves
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 27 août. Rens. : 04.28.28.12.12.

Moulins (03)

La fabuleuse aventure archéologique du docteur Bailleau
Guillaume-Joseph Bailleau (1830-1909) était un amateur d'archéologie. Il a contribué à enrichir les connaissances sur les premiers humains dans l'Allier. Dispersée à sa mort, sa collection a en partie été récupérée par le département.
Musée Anne-de-Beaujeu, place du colonel Laussedat, jusqu'au 17 septembre. Rens. : 04.70.20.48.47.

Paris (75)

Métamorphoses
Conçus pour les enfants, cinq espaces thématiques (forêt, miroir, ombres…) abordent la notion de transformation dans le monde du vivant, de l'énergie, des matériaux.
Lire notre reportage : sciav.fr/917meta
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 24 novembre 2024. Rens. : 01.40.05.80.00.

Urgence climatique
Sur pas moins de 2000 m², cette exposition permanente pointe

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

le rôle des États, des villes, mais aussi des citoyens dans les bouleversements climatiques en cours. Et dans leurs solutions possibles.
Lire notre reportage : sciav.fr/917urgence
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou. Rens. : 01.40.05.80.00.

Médecines d'Asie, l'art de l'équilibre

C'est la première exposition en France consacrée aux trois grandes médecines orientales, d'Inde, du Tibet et de Chine. Quatre espaces thématiques explorent les mythes, le diagnostic, la « médecine de l'âme » et le dialogue Orient-Occident.
Lire notre reportage : sciav.fr/917guimet
Musée national des arts asiatiques Guimet, 6, place d'Iéna, jusqu'au 18 septembre. Rens. : 01.58.52.53.00.

Félins

Le monde des félins en 80 naturalisations et 10 squelettes dynamiques. Certaines pièces de taxidermie remontent au XVIIIe siècle, d'autres ont été créées pour l'occasion.
Lire notre reportage : sciav.fr/914felins
Grande Galerie de l'évolution, 36, rue Geoffroy Saint-Hilaire, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens. : 01.40.79.56.01.

Strasbourg (67) / Exposition

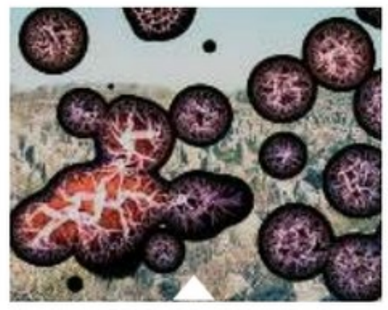
PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

Prix photographie et sciences

Le projet de Richard Pak, « L'île naufragée », et celui de Manon Lanjouère, « Les Particules », tissent un lien fertile entre art et recherche. Les lauréats 2021 et 2022 du Prix Photographie & Sciences (à l'initiative de La Résidence 1+2 avec le ministère de la Culture, l'ADAGP, le CNRS, Stimultania Pôle de Photographie, la Casden et Picto Fondation), dont notre magazine est partenaire, exposent dans une captivante scénographie. Richard Pak témoigne du destin de l'île de Nauru, en Micronésie, ravagée par la surexploitation du phosphate. Elle en porte les stigmates, autant que les négatifs de ses photos qu'il soumet à un traitement chimique corrosif. L'univers imaginé par Manon Lanjouère s'affiche sur des cimaises bleu océan : ses cyanotypes sur verre reproduisent les formes bioluminescentes du plancton, étudié lors d'une résidence sur la goélette *Tara*. L'artiste les a créées, puis photographiées, à partir d'objets en plastique qui polluent par tonnes les océans. ■ **Andréina De Bei**

Stimultania Pôle de Photographie, 33, rue Kageneck, jusqu'au 16 septembre. Rens. : 03.88.23.63.11.

« Tubularia indivisa » de Manon Lanjouère.



M.LANJOUÉRE ET R. PA

« Topside #1371_01 » de Richard Pak.

Rennes (35)

Rire

Déjà présenté à Paris et Bordeaux, ce parcours accessible au jeune public, multipliant les petits ateliers, fait du rire un objet scientifique. On le trouve chez les humains, les animaux, il a des effets sur le corps et a une dimension sociale.
Espace des Sciences, Les Champs Libres, 10, cours des Alliés, jusqu'au 3 septembre. Rens. : 02.23.40.66.00.

Rives-en-Seine (76)

Vikings ! Tempête sur la Seine

Cette exposition en accès libre s'organise autour d'un *faering*, bateau de pêche scandinave traditionnel. Elle explique pourquoi les Vikings se sont intéressés à la Normandie. Elle est en lien avec deux autres à Rouen et à Caen.
MuséoSeine, avenue Winston-Churchill, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 02.35.95.90.13.

Bordeaux (33) / Exposition

Jangala, au cœur de la jungle indienne

Après la parution en 1894 du *Livre de la jungle* de Rudyard Kipling, la jungle devient dans l'imaginaire collectif une forêt luxuriante et sauvage. Or ce terme issu du sanskrit *jangala* désigne en réalité les terrains arides et accidentés. Ce sont les diverses *jangala* que le muséum de Bordeaux propose de découvrir, en se concentrant sur la péninsule indienne, soit 4,5 millions de km² de milieux très variés. Viennent ensuite les lisières, notamment entre les forêts tropicales sèches et les humides. Ces dernières correspondent à la forêt luxuriante de Kipling. Puis les contreforts de l'Himalaya. Tout au long du parcours, le musée présente un peu plus de 160 espèces, dont de nombreux insectes.
Lire notre reportage : sciav.fr/914jungle ■ **Anne-Sophie Tassart**

MUSÉUMDEBORDEAUX

160 espèces sont présentées.

Muséum de Bordeaux, 5 place Bardineau, jusqu'au 17 septembre. Rens. : 05.24.57.65.30.

Rocquencourt (78)

Insectes, au service des écosystèmes

Sur 1,6 km en extérieur, des maquettes 2D, des boîtes entomologiques, des photos macroscopiques mettent en évidence le rôle essentiel des insectes pollinisateurs. Les abeilles mais aussi les mouches, les papillons, les coléoptères.
Arboretum de Versailles-Chèvreloup, 30 route de Versailles, jusqu'au 5 novembre. Rens. : 01.39.55.53.80.

Vaulx-en-Velin (69)

De la Terre aux étoiles

Cette exposition produite par la Cité de l'espace de Toulouse présente les technologies inventées pour explorer l'Univers. Elle détaille les activités humaines dans l'espace, qu'il s'agisse de vie quotidienne, de sciences ou de tourisme.
Planétarium, place de la Nation, jusqu'au 2 janvier 2024. Rens. : 04.78.79.50.12.

LE CIEL DE JUILLET

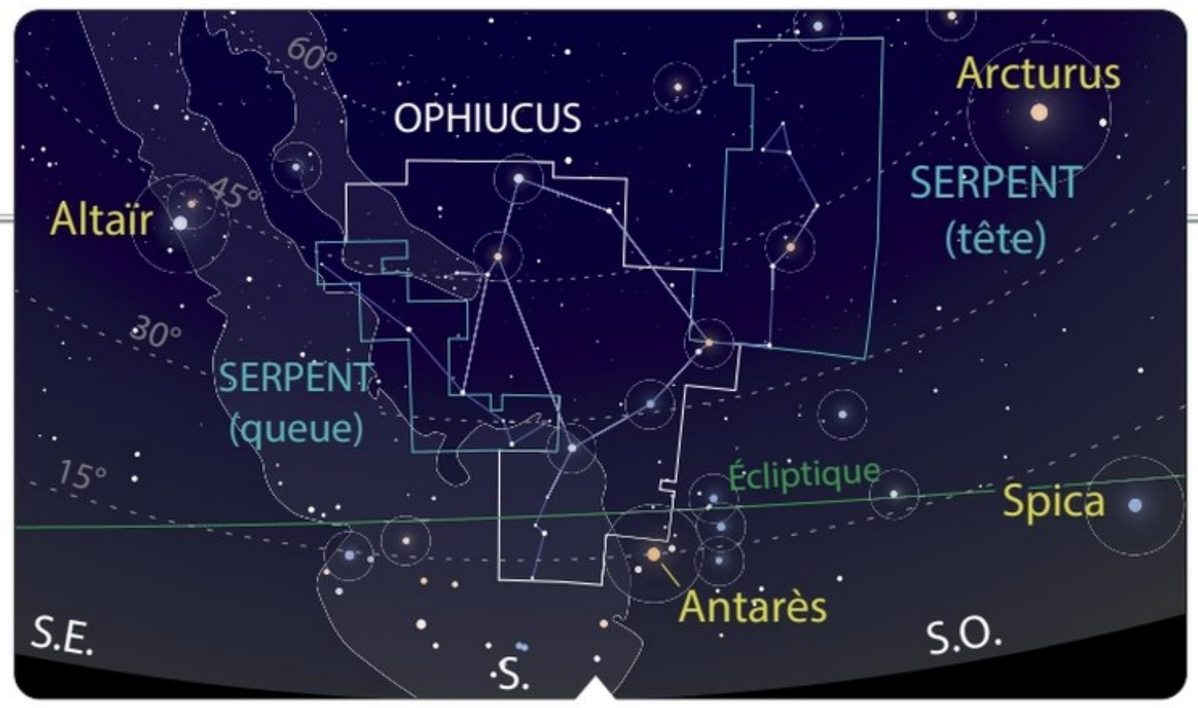
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète passe en conjonction supérieure le 1er puis s'écarte progressivement de la direction de l'astre du jour. Elle n'est pas observable ce mois, perdue dans l'éclat du Soleil couchant.

VÉNUS Encore visible en début de mois en soirée (elle se couche 2 h 10 après le Soleil le 1er), l'étincelante étoile du Berger plonge ensuite rapidement dans la direction de notre étoile jusqu'à disparaître durant la dernière semaine de juillet. Nous la retrouverons dès le mois prochain en fin de nuit.

MARS Désormais peu brillante, la planète Rouge est observable en soirée. Assez proche de Vénus en première quinzaine, elle se dévoile timidement, basse vers le couchant.



Vers minuit, Ophiucus et le Serpent dominent l'horizon sud tout ce mois.

Ophiucus et le Serpent, stars estivales

ASSEZ PEU CONNUES, ces deux constellations sont typiques des nuits d'été. Le Serpent présente la particularité unique d'être divisé en deux parties non contiguës. Ophiucus, appelé aussi le Serpentaire, est traversé par l'écliptique. Il reçoit la visite du Soleil du 30 novembre au 18 décembre environ : il s'agit de la treizième constellation du zodiaque.

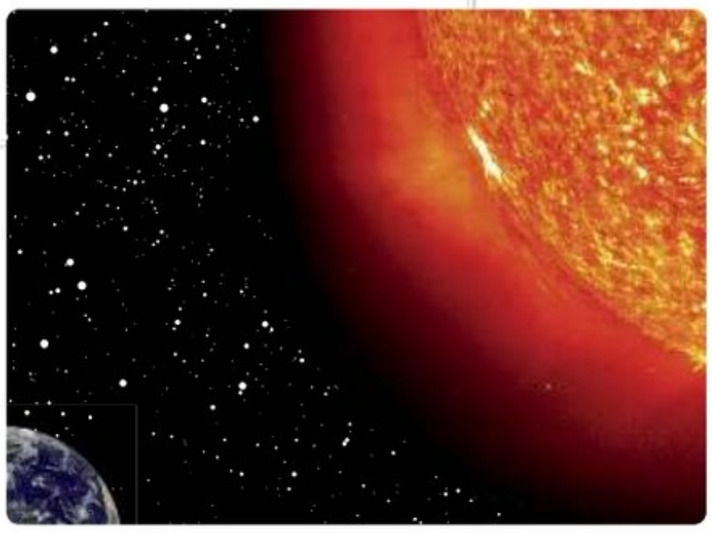
Notre conseil. L'observation de ces constellations nécessite un ciel bien sombre, dénué de pollution lumineuse.

JUPITER La plus imposante des planètes se lève en milieu de nuit. De mieux en mieux visible au petit matin au fil des semaines, elle est l'astre le plus brillant du ciel de fin de nuit.

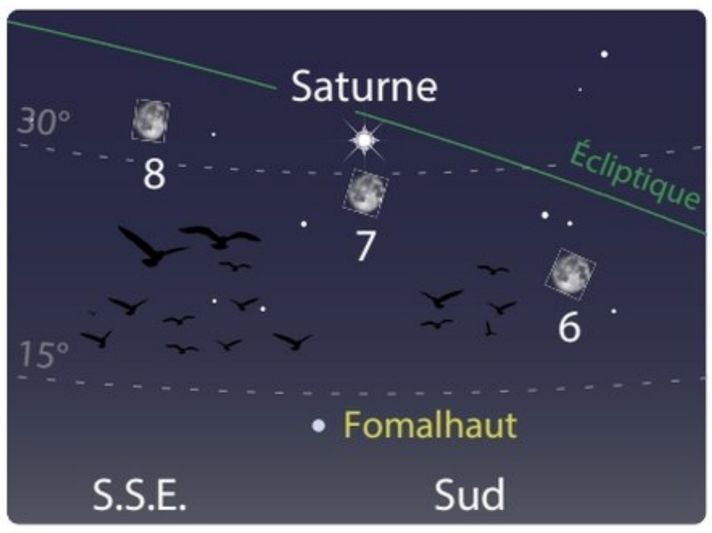
SATURNE À un mois de son passage à l'opposition, la planète aux anneaux se trouve déjà dans de bonnes conditions d'observation. Visible une grande partie de la nuit, elle culmine vers le sud à une bonne trentaine de degrés de hauteur aux lueurs de l'aube.

L'appli du mois

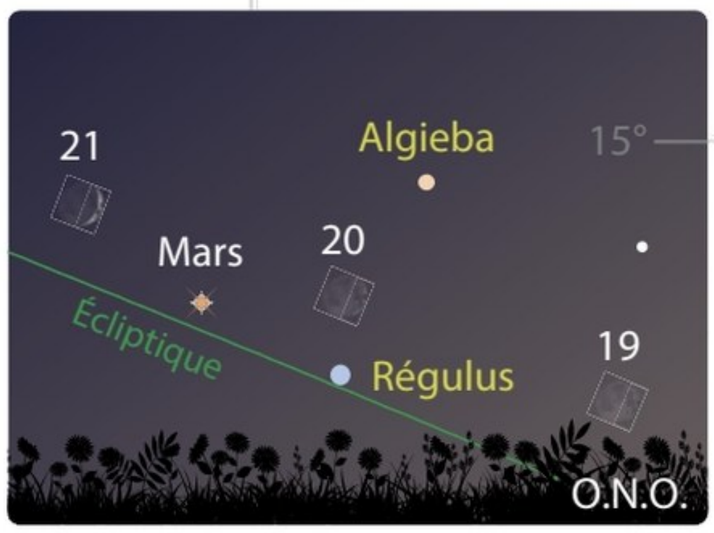
LUNESCOPE PRO est une application payante (3,89 euros) en français pour Android. Elle fournit la phase de la Lune pour n'importe quelle date, un calendrier des phases passées et à venir, une carte détaillée de la surface et une représentation des éclipses de Lune entre 1950 et 2050.



JEUDI 6, À 22 H 07 MIN TRÈS PRÉCISÉMENT, la Terre passe à l'aphélie. La distance Terre-Soleil atteindra en cet instant son maximum pour 2023 et s'élèvera à 152 093 251 km.



LE MATIN DU 7, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune sera à un peu plus de 3° au sud de la planète Saturne. L'étoile Fomalhaut sera le témoin de ce rapprochement.



LES 20 ET 21, 45 MIN APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, un très fin croissant lunaire se tiendra non loin de la planète Mars et des étoiles Régulus et Algieba du Lion.

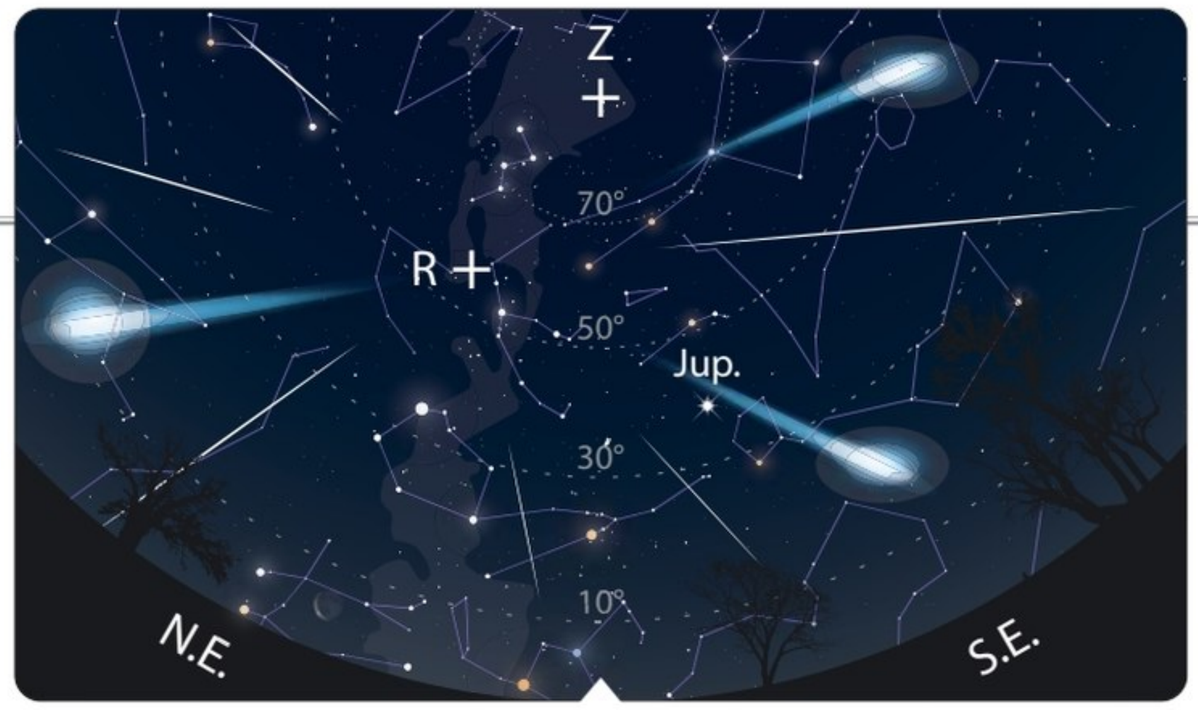
Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de juillet

Où sont les planètes ?

MERCURE La « planète de fer » atteint sa plus grande distance (27°) à l'est du Soleil le 10. Malgré cette élongation favorable, elle n'est pas observable sous nos latitudes en raison d'un écliptique très peu incliné sur l'horizon le soir.

VÉNUS L'étoile du Berger passe en conjonction inférieure le 13 et se trouve alors entre le Soleil et la Terre. Elle se dégage ensuite assez rapidement des lumières du levant et devient observable durant la dernière semaine d'août, le matin vers l'est.

MARS La planète Rouge demeure visible en soirée, peu brillante et basse vers l'ouest. Elle ne se trouve plus du tout dans de bonnes conditions d'observation.



Il est 4 h du matin en ce 13 août et nous sommes tournés vers l'est. Z est le zénith, R le radiant.

Sous une pluie d'étoiles filantes

LES PERSÉIDES sont la pluie d'étoiles filantes la plus célèbre d'entre toutes. Elle devrait être magnifique cette année car, au voisinage de la nouvelle lune (ce sera le 16), l'absence de pollution lumineuse générée par notre satellite est appréciable. Durant la nuit du 12 au 13, vous pourriez ainsi observer plusieurs dizaines de météores par heure. Ils sembleront émaner d'un point, le radiant, situé dans la constellation de Persée.

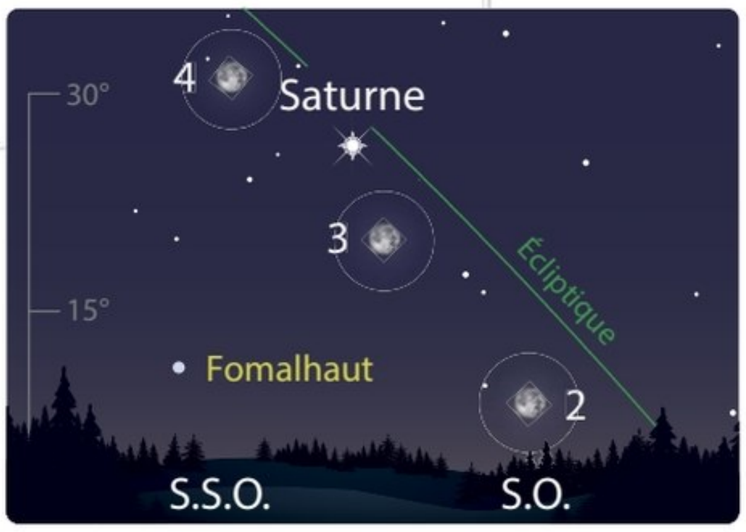
Notre conseil Une chaise longue, des vêtements chauds et de la patience sont tout ce dont vous aurez besoin !

JUPITER La planète géante se lève autour de minuit et atteint une cinquantaine de degrés de hauteur en fin de nuit. Très brillante, elle est alors immanquable. Jupiter sera la reine des nuits d'automne !

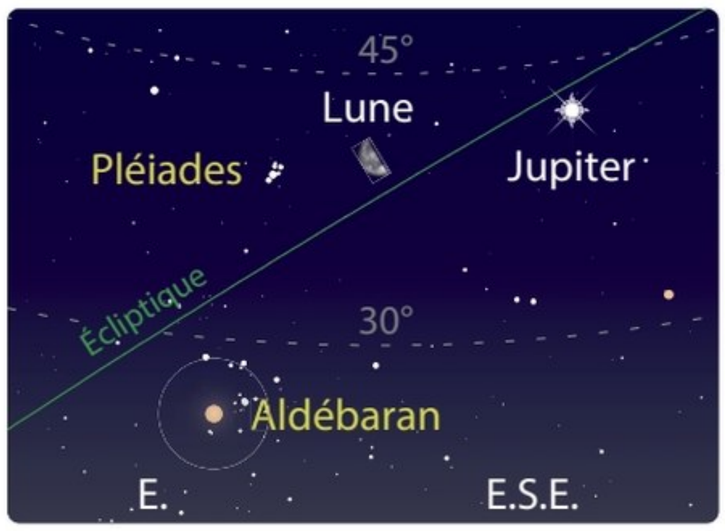
SATURNE La planète aux anneaux passe à l'opposition le 27 dans la constellation du Verseau. C'est le moment idéal pour l'observer à l'œil nu ou à travers un instrument d'optique. Visible toute la nuit et au plus près de la Terre, elle est à son maximum d'éclat pour l'année.

L'appli du mois

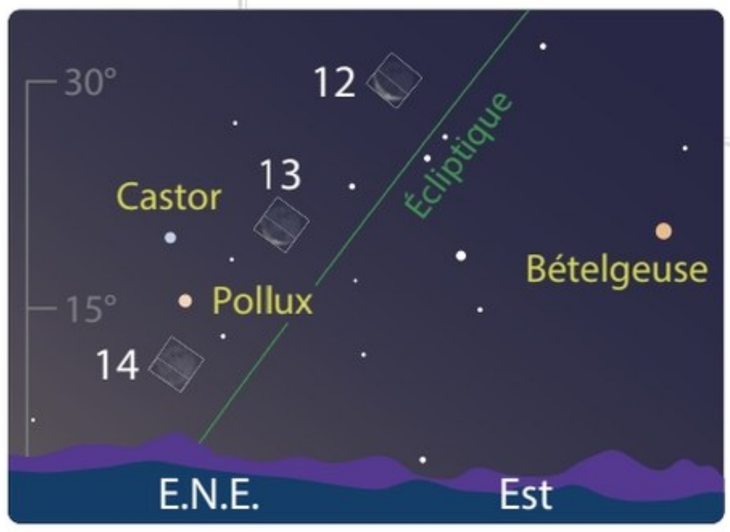
ISS ON LIVE est une application gratuite en français pour Android. Elle permet d'observer la Terre en direct depuis la Station spatiale internationale et de connaître, au même moment, sa position sur un planisphère. Elle donne aussi les heures et la localisation de ses passages spectaculaires dans votre ciel.



LES 3 ET 4, LA LUNE PRESQUE PLEINE nous permet de repérer sans ambiguïté la lointaine planète Saturne. La scène est montrée ici 1 h avant le lever du Soleil.



LE 9, 2 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, un joli rapprochement prendra place entre la Lune, la planète Jupiter, l'amas d'étoiles des Pléiades et l'étoile Aldébaran du Taureau.



DU 12 AU 14, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, le très fin croissant de Lune se rapprochera de Castor et Pollux des Gémeaux, une constellation emblématique des longues nuits d'hiver.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'août

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Une France à +4 °C de réchauffement ?

La trajectoire de réchauffement dite de référence pour la France, pour caler les politiques d'adaptation au changement climatique de tous les secteurs d'activité (agriculture, santé, etc.), est désormais fixée : elle aboutit à +4 °C en fin de siècle. Cette annonce a donné lieu à beaucoup de confusion dans la sphère médiatique, car ce chiffre fut parfois mis en regard avec les seuils de 1,5 ou 2 °C inscrits dans l'accord de Paris, et qui correspondent au niveau de réchauffement global, une cible qui permet de déterminer le budget carbone restant pour calibrer la réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre (atténuation). En revanche, le chiffre de +4 °C constitue une référence pour calculer les niveaux de risques auxquels la France doit se préparer (adaptation). Cette trajectoire fixée à +4 °C en France est qualifiée à tort de « pessimiste ». Elle est plutôt réaliste, car elle correspond au scénario dit tendanciel, celui vers lequel nous engagent les politiques publiques implémentées aujourd'hui dans le monde. Pour calibrer les dispositifs d'adaptation et de gestion de risques associés, il faut décliner ces +4 °C en événements extrêmes. Car dans une telle France, chaque été a une probabilité de 10 % d'être au-dessus de +7 °C, et de 1 % d'être au-delà de +9 °C. Les étés de type 2022 et même 2003 sont de ce point de vue des étés froids. Une telle France est difficilement imaginable si on continue de la penser selon nos repères actuels, alors que nos paysages, agriculture, industrie, tourisme, modes de vie seront radicalement transformés. On ne mesure pas ce que signifient ces +4 °C pour la biodiversité terrestre et marine. N'oublions pas que la meilleure adaptation, c'est l'atténuation. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

Un assistant nommé ChatGPT

J'ai demandé à l'agent conversationnel ChatGPT : *« Comment simplifier les tâches administratives accomplies par les chercheurs ? »* Il m'a proposé de simplifier le remboursement de frais professionnels par un niveau de bureaucratie variable selon leur montant : simple déclaration jusqu'à 100 euros, puis justification, allégée jusqu'à 500 euros, complète au-delà. Impressionnant ! Comment lui a-t-il été possible d'être si pertinent ? Le principe de cet agent conversationnel est d'explorer un espace synthétisant les contenus du corpus des documents à partir desquels il a fait son apprentissage. Mon usage d'un vocabulaire connoté « bureaucratie de l'enseignement supérieur et de la recherche » pendant nos interactions préalables l'a positionné dans un coin de cet espace contenant des fragments de notes et rapports sur ce type de sujet, et sa proposition en est donc inspirée. Il a alors suivi le cheminement naturel résultant de l'enchaînement des fragments populaires dans ce coin de l'univers, comme un guide qui, alors que les lieux lui sont inconnus, construirait un itinéraire approprié (y compris les détours pour contourner les éventuels obstacles, même invisibles) à partir des sentes esquissées dans l'herbe, de la profondeur des traces, et d'autres indices. Si on a les connaissances pour bien le positionner avant son travail, et le jugement pour évaluer sa production après, ChatGPT peut être un assistant précieux. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Doit-on autoriser le changement rétroactif de nom ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

Dans la *Genèse*, Saraï prit pour nom Sarah à l'âge respectable de 90 ans, ce qui mit fin à la malédiction qui la frappait de stérilité. Et, elle enfanta Isaac qui eut une longue descendance… Que l'on s'exile, que l'on divorce, que l'on adopte une autre religion ou que l'on assume un genre différent, en se choisissant un nom nouveau on rompt avec sa vie antérieure et on parachève ainsi la rupture avec un passé que l'on juge odieux; on l'entérine; on s'en dégage pour l'oublier et se consacrer tout entier à la vie qu'on s'est donnée. La loi l'autorise à condition de justifier d'un « *motif légitime* », notion très floue et relativement souple qui repose sur l'usage et l'appréciation du magistrat chargé de trancher. Aujourd'hui, en France, on dépose chaque année environ 2800 demandes de modification de l'acte de naissance afin d'y faire mention d'une nouvelle identité, et 90 % d'entre elles sont acceptées. Au regard des promesses qui s'ouvrent, toute évocation du passé honni dont on souhaite se détacher peut paraître insupportable. Afin de ne pas se retourner dessus, certains désirent abolir toute mention de l'état d'avant. Lorsqu'on envisage le futur, cela ne pose pas de problème. Mais, comment procéder si l'on a une œuvre d'artiste ou de scientifique? D'où la demande de certains chercheurs, lorsqu'ils changent de nom ou de genre, de modifier rétrospectivement la mention de leur identité sur leurs travaux antérieurs. En effet, lorsqu'ils souhaitent reconstituer leur carrière en établissant leur bibliographie, ressurgit la personne ancienne avec laquelle ils veulent rompre. Il s'ensuit une grande souffrance et un préjudice possible, au cas où les publications antérieures ne seraient pas comptabilisées. La compassion devrait conduire à accéder à leur demande, à savoir modifier rétroactivement l'identité des signataires d'articles et d'ouvrages anciens, et donc à expurger les bibliothèques. Mais, comment ne pas craindre les effets en chaîne d'une telle modification? La réécriture du passé laisse redouter le pire, surtout à l'heure où le numérique autorise toutes les falsifications ! ■

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

En 2035, en Europe, seuls les véhicules zéro émission, donc essentiellement électriques, seront autorisés à la vente. La France avance ainsi à marche forcée vers le déploiement des bornes électriques sur son territoire. Le premier objectif de 100 000 bornes de recharge vient d'être atteint, ce qui permet de commencer à rattraper notre retard par rapport aux voisins européens. Cependant, se pose désormais la question de l'entretien de ce réseau et du déploiement de bornes de charge rapide, encore peu nombreuses. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIQUE

Pourquoi a-t-on l'impression que la route est mouillée au loin, en été ?

Makv M.

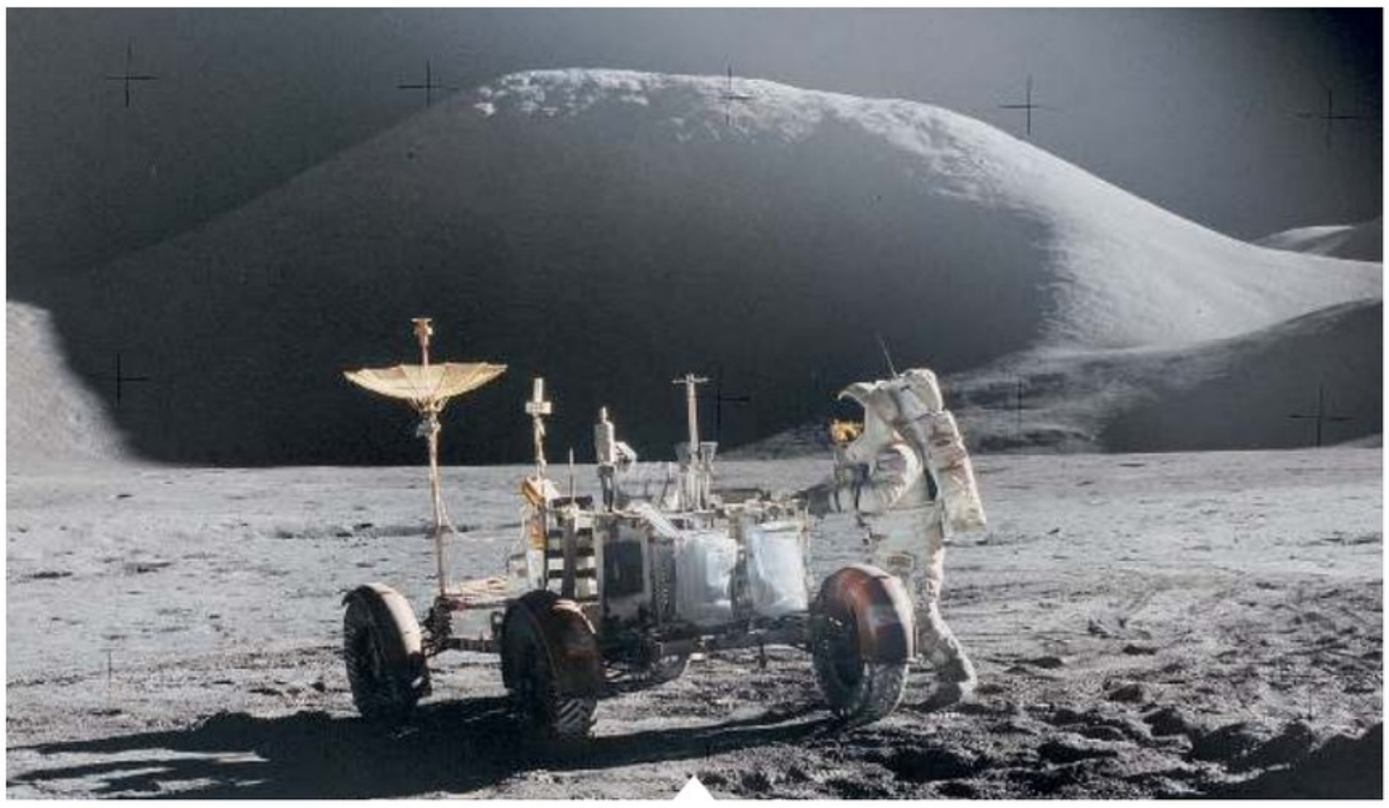
Cet effet vient du changement de réfraction de la lumière, lui-même lié aux brusques variations de température près de la route. Si la température de l'air extérieur est de 30 °C, la surface de la route, elle, peut monter jusqu'à 70 °C. Mais quelques centimètres au-dessus, l'air n'est qu'à 35 °C. « *Cette variation très rapide de température dévie les rayons de lumière* », explique Daniel Hennequin, physicien au CNRS. Ainsi, au lieu de frapper le sol avant d'être réfléchis, les rayons lumineux se courbent et sont renvoyés sans toucher la surface. Résultat : au loin, on ne voit pas ce qu'il y a en dessous, et c'est le ciel qui se réfléchit sur la route ! ■ **Lise Loumé** @Lise_Loume

ZOOLOGIE

Comment les chats ronronnent-ils ?

Thibaut T.

Les ronronnements du chat restent mystérieux. On sait cependant que ce phénomène implique tout l'appareil vocal de l'animal. Toutes les 30 secondes, un réseau de neurones spécialisés provoque les contractions des muscles laryngés durant 10 à 15 millisecondes et cela déplace la glotte. C'est la fermeture du conduit vocal par la glotte qui entraîne une forte augmentation de la pression et l'ouverture des cordes vocales, laquelle laisse passer l'air. « *Toutefois, on n'a pas encore identifié de centre du ronronnement dans le cerveau* », nuance Jean-Yves Gauchet, vétérinaire à Toulouse. ■ **L. L.**



NASA

Le jour lunaire dure 14 jours sur notre satellite naturel.

PHYSIQUE

Quelle heure est-il sur la Lune ?

Vinh H. L.

La réponse n'est pas simple car les agences spatiales du monde entier ont beau avoir les yeux rivés vers la Lune, elles n'ont pourtant pas encore accordé leurs montres ! Pour y parvenir, elles ont sollicité le Bureau international des poids et mesures (BIPM), basé en France. La première idée qui vient à l'esprit serait de faire comme sur Terre : se fonder sur la durée du jour sur la Lune pour définir des heures. « *L'ennui, c'est que la durée d'ensoleillement lunaire est de 14 jours*, précise Frédéric Meynadier, physicien au BIPM. *Il est hors de question que des astronautes se calent sur un tel rythme, ils resteront sûrement sur 24 heures.* »

Faut-il alors importer sur la Lune l'heure terrestre, en choisissant le « temps universel coordonné » (UTC en anglais) ? « *Malheureusement, la théorie de la relativité montre que deux horloges parfaitement accordées sur la Lune et la Terre vont se désaccorder sitôt séparées* », répond Frédéric Meynadier. La masse de la Lune ne représentant que 1,2 % de celle de la Terre, l'horloge lunaire gagnera 56 microsecondes toutes les 24 heures. Trop pour l'exactitude demandée par certaines missions spatiales. Il semble donc plus simple d'adopter une échelle de temps lunaire intermédiaire, dont la relation à l'UTC sera à préciser. « *Il faudra définir le temps lunaire avec attention pour simplifier le passage à la pratique* », conclut le spécialiste. Ce temps lunaire est d'autant plus nécessaire que les agences spatiales envisagent d'installer un système de géolocalisation sur la Lune, similaire au GPS. Or, le système de triangulation à la base du GPS mesure des intervalles de temps. ■

Fabrice Nicot @fnicot07

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 916, juin 2023

Panagramme

Mot 1 : DS ; mot 2 : LOLA ; mot 3 : NOUE ; mot 4 : DÉSOLA ; mot 5 : NU ; mot 6 : DANSEUSE ; mot 7 : ALU ; mot 8 : NOUS ; mot 9 : ÉLUDA ; mot 10 : NOUNOUS ; mot 11 : DALLES ; mot 12 : DANS ; mot 13 : DELANOË.

1 S	2 L	O	D D	3 E	U	4 A	5 N
D	6 S	L	A	N	O	E	U
N	E	7 A	U	L	D	O	S
A	D	S	E	U	L	8 N	O O
9 E	A	D	10 N	O	S	U	11 L
L	O	U	S	12 A	N	D	E
U	N	13 E	O	S	A	L	D
O	U	N	L	D	E	S	A

La somme de mille

On peut remarquer que les chiffres des nombres 0 et 999 ont pour somme 27, de même que 1 et 998, que 2 et 997, etc., jusqu'à 499 et 500.

Ce qui donne 500 couples de somme 27, soit 13 500. L'écriture de 1000 même demande d'ajouter 1, d'où une somme de 13 501.

La fable cachée

LA LAITIÈRE ET LE POT AU LAIT est écrite alternativement par les quatrièmes et troisièmes lettres des mots qui se suivent.

OPALE, ACAJOU, VIOLET, AMANDE, ABRICOT, PÉTROLE, KAKI, PIERRE, AMBRE, CRÈME, OCRE, CITRON, VIOLET, GRÈGE, TAUPE, CHOCOLAT, MOUTARDE, BLANC, GLAUQUE, LILAS, INCARNAT, BEIGE, VERT

L'heure de l'église

Lorsque l'horloge sonne 5 heures, il y a 4 intervalles entre les coups. Chaque intervalle dure 6/4, soit une seconde et demie. Le temps mis pour sonner 9 heures confirme cette durée (8 x 1,5 = 12).

Il y a autant d'intervalles que de coups moins un. Dans la journée, cela fait un total de :

2 x (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11) = 132 intervalles.

La durée totale est de 132 x 1,5 = 198 secondes.

En surveillant Éden

A	D	E	G	I	M	N	R	V
6	3	2	1	7	4	8	0	5

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 909 L'avant Big Bang

N° 910 La science lit dans les pensées

N° 911 Les origines de la vie

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

N° 913 Fusion nucléaire : une révolution pour l'humanité

N° 914 Les clés du contrôle de soi

N° 915 Les solutions pour produire son énergie

N° 916 James-Webb : une nouvelle histoire de l'Univers

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 909 ❑ N° 910 ❑ N° 911 ❑ N° 912
❑ N° 913 ❑ N° 914 ❑ N° 915 ❑ N° 916

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Projet de voyage

Dans ce choix de destinations, l'une d'elles est aberrante. Laquelle et pourquoi ?

AUBUSSON, CONCARNEAU, ESTRAMIAC, LABARRÈRE, MONTROUGE, SAUVETERRE, VANNES

Citations croisées

Trouvez une citation de Napoléon 1er à travers une autre d'Élysée Reclus. Les chiffres sous les cases vides donnent le numéro du mot de la première citation dont la lettre provient.

L HISTOIRE N EST QUE LA GÉOGRAPHIE DANS LE TEMPS COMME

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

LA GÉOGRAPHIE N EST QUE L HISTOIRE DANS L ESPACE

12 13 14 15 16 17 18 19 20 21

6	7	2	8	15	11	18	13	11	15	10	4	5	19	21	8	5	13	2	9	
19	21	10	21	8	15	7	14	13	15	18	15	16	2							
9	21	10	16	5	2	6	8	1	16	15	18	2	11	10	16	15	8	9		
21	7	8	10	10	2	19	8	19	21	11	2	13	8							

Logique de roulette

Après quelques tours de roulette, trois joueurs confrontent leurs marques.

« Le rouge est sorti 4 fois et le noir 5 fois », dit le premier.

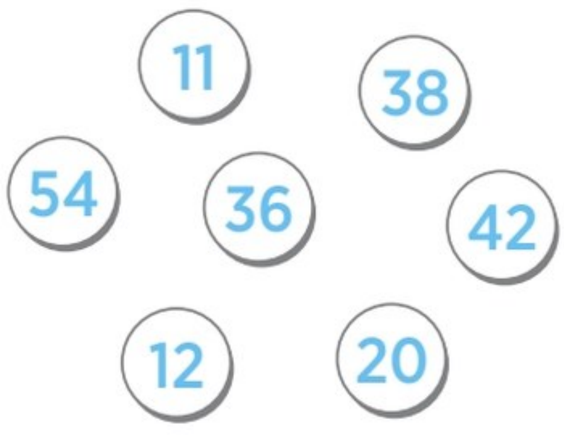
« Le noir est sorti 3 fois et le rouge 7 fois », affirme le second.

« Pas du tout, rétorque le troisième, *le rouge est sorti 7 fois, le noir 5 fois. »*

Sachant qu'un des joueurs a raison et que les deux autres se trompent à moitié, qui a raison ?

Particularités

Trouvez au moins sept manières de distinguer un intrus logique parmi ces nombres.



Carré latin

Chaque ligne et chaque colonne, toutes différentes, sont composées des nombres de 0 à 9.

Les sommes des segments blancs, horizontaux et verticaux figurent en marge.

Complétez la grille.

		23	21	3	5	20	22	23		23	35
		20	15	23	32	20	9	12	26	12	8
16	5						■	■	■	■	
21	8								■	■	
8	29			■	■						
11	32				■						
5	34				■						
24	7					■	■	■			
28	6	■	■							■	
	42									■	■
	17	23			■						
6	21	9			■				■		

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5€**

CODE PRIVILÈGE : **CS445**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3)*.

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (2), (5)*.

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.** Idéal avec le Safran.

6€ 45 comprimés

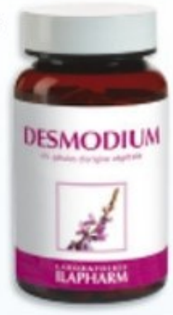
Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6€ 45 gélules

Draineur hépatique
DESMODIUM

Draineur hépatique par excellence, il favorise le **fonctionnement du foie.**



5€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire.**

5€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.** *(6), (8)*.
*Allergène : **poisson**.*

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(7)*.

6€ 30 gélules

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran BIO participe au maintien de **l'érection** et **stimule le désir sexuel**. *(2), (4)*.

6€ 20 gélules

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire.**

6€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.**

6€ 10 ampoules ~~15,10€~~ *(1), (2), (9)*.

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise le **désir**, la **capacité** et les **performances sexuelles.** *(2), (11)*.

6€ 45 gélules

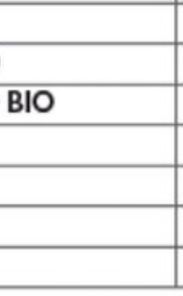
Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**



5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9)*.

6€ 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

LE DUO DE VERRES

OFFERT

Dimensions : Diamètre haut : 7,3 cm ; Diamètre base : 6,5 cm ; Hauteur : 8,5 cm. Capacité environ : 220 ml.

\+

Les Frais de Port RÉDUITS au lieu de ~~6,50 €~~ **2€ SEULEMENT**

\+

dès **5€** **TOUS VOS PRODUITS**

EXEMPLE :

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	6,00€
LE DUO DE VERRES	OFFERT
Frais de port	2,00€
TOTAL	**30,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. (11) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| 19 |_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Recommandé pour la livraison.* de **ses partenaires ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Desmodium	PDE45		5€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **DUO DE VERRES** et mon **CATALOGUE**				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€, **j'ajoute 2€ de frais de port**				
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS445**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque, avec votre bon de commande,** il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité Fevad · synadiet · La Poste

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

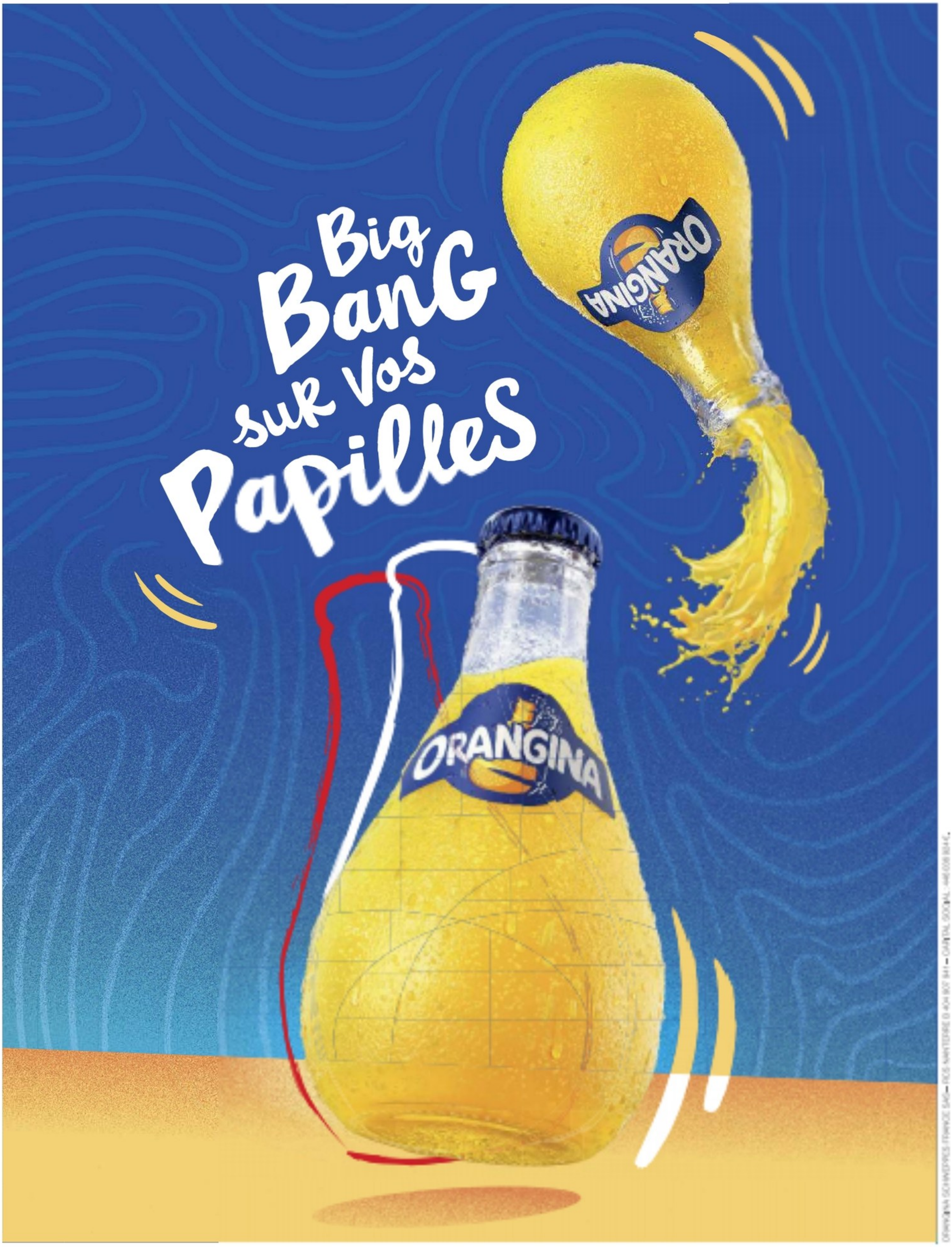
Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX



POUR VOTRE SANTÉ, MANGEZ AU MOINS CINQ FRUITS ET LÉGUMES PAR JOUR. WWW.MANGERBOUGER.FR